



СОФИЙСКИ УНИВЕРСИТЕТ
„СВ. КЛИМЕНТ ОХРИДСКИ“
ФИЗИЧЕСКИ ФАКУЛТЕТ
ЯДРЕНА ЕНЕРГЕТИКА И
ТЕХНОЛОГИИ

ДИПЛОМНА РАБОТА

Тема:

“Отравяне на реактора от ^{135}Xe . Анализ на ксенонови процеси при преходни режими с изменение на мощността за реактори ВВЕР-1000”

Дипломант:

Елена Георгиева Горанова

Фак. №: 1РН4700008

Научен ръководител: н-к отдел РФТ Марин Стоянов

Консултант: доц. Пламен Петков

София, 2026 г.

1. Увод.....	стр.3
2. Цели на работата.....	стр.3
3. Реактивност. Коефициент на размножение.....	стр.4
4. Коефициенти и ефекти на реактивността.....	стр.6
• Коефициент на реактивност по температура на топлоносителя.....	стр.7
• Коефициент на реактивност по топлинна мощност	стр.8
• Коефициент на реактивност по концентрация на борна киселина.....	стр.8
• Реактивностният ефект от въвеждане на органите за регулиране (ОР СУЗ).....	стр.8
5. Ксенонови процеси в активната зона.....	стр.9
5.1 Образуване и изчезване на ^{135}I и ^{135}Xe	стр.10
5.2 Връзка реактивност-отравяне.....	стр.10
5.3 Уравнения за изменение на концентрациите на ^{135}I и ^{135}Xe	стр. 12
5.4 Равновесни концентрации на ^{135}I и ^{135}Xe	стр.12
5.5 Йодна яма.....	стр.13
5.6 Ксенонови колебания и аксиален офсет.....	стр.14
6. Борно регулиране на реактор ВВЕР-1000.....	стр. 15
6.1. Борна киселина като средство за регулиране на реактивността.....	стр. 15
6.2. Концентрация и ефективност на разтворимия бор.....	стр.15
7. Баланс на реактивност.....	стр. 17
8. Изчислителни средства и методика на пресмятане.....	стр. 18
8.1 Програма CriticalCalc.....	стр.18
8.2 Програмен комплекс HEX3D.....	стр.20
8.3. Методика за пресмятане на преходните процеси на ^{135}Xe	стр. 20
8.4. Определяне на реактивностния ефект от изменението на концентрацията на ^{135}Xe	стр. 21
8.5. Определяне на критичната концентрация на борна киселина при изменение на мощността.....	стр.21
8.6. Входни данни и начални условия за пресмятанията.....	стр.25
9. Резултати и сравнителен анализ.....	стр.27
9.1 Преходни процеси на ^{135}Xe при изменение на мощността от 0%-104%.....	стр.27
9.2 Преходни процеси на ^{135}Xe при изменение на мощността от 104%-0%.....	стр.32
9.3 Преходни процеси на ^{135}Xe при изменение на мощността от 104%-75%.....	стр.37
9.4 Преходни процеси на ^{135}Xe при изменение на мощността от 75%-104%.....	стр.43
10. Заключение.....	стр. 46
11. Използвана литература.....	стр.47

1. Увод

Безопасната и надеждна експлоатация на ядрените енергийни реактори е свързана с непрекъснат контрол на състоянието на активната зона и поддържане на необходимия баланс на реактивността. В процеса на работа този баланс се повлиява от изгарянето на ядреното гориво, натрупването на продукти на делене и възпроизводството на ядрено гориво и бива изменян под влияние на промяна на температурата на ядреното гориво, промяна на температурата на топлоносителя, съответно неговата плътност (при запазване на налягането в реакторна среда), промяна в концентрацията на борната киселина и положението на органите на регулиране, изменение на мощността на реакторната установка.

Съществено влияние върху НФХ на реактора оказва ^{135}Xe , поради голямото си сечение на поглъщане на топлинни неутрони $2.7 \times 10^6 \text{ b}$, [1].

Ксеноновите преходни процеси имат особено значение при понижаване и повишаване на мощността, при пускане и след спиране на реактора. При изменение на мощността на реактора се нарушава установеното равновесие между процесите на образуване и загуба на ^{135}Xe , в резултат на което концентрацията му в активната зона се изменя във времето. Това води до съответното изменение на ксеноновото отравяне и рефлектира пряко върху реактивността на реактора.

При реакторите ВВЕР-1000 регулирането на реактивността се осъществява чрез дозиране на борна киселина в топлоносителя и чрез въвеждане в активната зона на ОР СУЗ. Поради тази причина при анализа на преходния процес е необходимо наред с промяната в концентрацията на ядрата на ^{135}Xe и влиянието на тази промяна върху реактивността на реактора да се отчитат мощностният и температурният ефект (при въведената промяна на мощността) и промените в положението на ОР СУЗ, също изменението на концентрацията на борната киселина. Именно съвкупността от посочените параметри би определила дали реакторът е критичен, подкритичен или надкритичен. Поддържане в критично състояние с постоянна мощност на реакторната установка изисква подходяща комбинация измежду тези параметри (според ефекта върху реактивността на всеки от тях) в рамките на възникнал преходен процес.

За оценка на тези ефекти се използват разчетни програми, чрез които могат да бъдат определени измененията на основните НФХ във времето. Сравнението на резултатите, получени чрез различни изчислителни подходи, позволява да се оцени съответствието между използваните модели и особеностите при отчитане на отделните реактивностни ефекти.

В настоящата дипломна работа са разгледани ксеноновите процеси в активната зона на реактор ВВЕР-1000 при преходни състояния, свързани с изменение на мощността. Анализирани са изменението на реактивността вследствие на промяната на концентрацията на ^{135}Xe и съответното изменение на критичната борна концентрация за компенсиране на това въздействие. Извършено е сравнение на резултатите, получени с програмите CriticalCalc и HEX3DA (от комплекса за неутроннофизични пресмятания HELHEX), с цел оценка на поведението на използваните изчислителни модели при разглежданите преходни процеси.

2. Цели на настоящата работа

Основната цел на настоящата дипломна работа е изследване на ксеноновите преходни процеси в активната зона на реактор ВВЕР-1000 при изменение на мощността и сравнителен анализ на резултатите, получени чрез програмите CriticalCalc и HEX3D.

За постигането на тази цел се поставят следните задачи:

- Да се изследват и сравнят ксеноновите процеси в активната зона на реактор ВВЕР-1000 при различни експлоатационни състояния и различни моменти от горивната кампания
- Чрез анализ на изменението и пространственото разпределение на концентрацията на ^{135}Xe да се оценява влиянието на ксеноновото отравяне върху реактивността (програмно).
- Да се определи необходимото изменение на критичната концентрация на борната киселина за компенсиране на настъпващите изменения в реактивността
- Да се извършат пресмятания на разглежданите преходни процеси с CriticalCalc и HEX3DA от комплекса HELHEX
- Да се сравнят получените с двете програми резултати относно изменението на реактивността при преходни процеси и критичната концентрация на борната киселина, която следва да се дозира за компенсиране на реактивностното въздействие на процеса, и да се анализират наблюдаваните различия.
- Да се оценят разликите в получаваната борна концентрация и $\Delta\rho$ с CriticalCalc и HEX3DA.
- Да се оцени влиянието на момента на горивната кампания и началното състояние на активната зона върху протичането на разглежданите ксенонови процеси
- Част от процеса на валидация на CriticalCalc

3. Реактивност. Коефициент на размножение

Критичното състояние на реактора се определя от баланса между образуването, поглъщането и утечката на неутрони в активната зона. Този баланс зависи от скоростите на протичащите неутроннофизични процеси в активната зона.

При бавно изменение на сеченията във времето, вследствие на възпроизводство, изгаряне и натрупване на продукти от делене, техните стойности могат да се приемат за постоянни. Тогава чрез формално разделяне на източника от делене с величината k_{eff} балансът на реакциите може да се представи като нулев, като независимият източник обикновено се пренебрегва.

Това уравнение на неутронния пренос е известно като условнокритично, [4].

$$\Omega \cdot \nabla \phi(r, E, \Omega) + \Sigma_t(r, E) \phi(r, E, \Omega) = \int dE' \int d\Omega' \Sigma_s(r, E' \rightarrow E, \Omega' \rightarrow \Omega) \phi(r, E', \Omega') + \frac{1}{\lambda} \frac{\chi(E)}{4\pi} \int dE' \Sigma_v(r, E') \int d\Omega' \phi(r, E', \Omega') \quad (1)$$

$\Omega \cdot \nabla \phi(r, E, \Omega)$ - утечката на неутрони с енергия E и посока на движение Ω поради свободно прелитане на елементарен обем d^3r около точка r .

$R_t = \Sigma_t(r, E) \phi(r, E, \Omega)$ – скоростта на загуба на неутрони поради поглъщане и/или разсейване в обема d^3r , водещо до промяна на енергията и посоката на движение

$\int dE' \int d\Omega' \Sigma_s(r, E' \rightarrow E, \Omega' \rightarrow \Omega) \phi(r, E', \Omega')$ – скоростта на възникване на неутрони поради разсейване в обема d^3r , при което енергията и посоката на движение стават равни на разглежданите

$\frac{1}{\lambda} \frac{\chi(E)}{4\pi} \int dE' \Sigma_v(r, E') \int d\Omega' \phi(r, E', \Omega')$ – скоростта на възникване на неутрони от източник на делене

Σv - е съкратен запис на $v\Sigma f$, при което Σf е макроскопичното сечение на делене, а v е средният брой неутрони от делене

Интегрирането на уравнение (1) по всички променливи в обема и по околната повърхност на активната зона позволява да се получи връзка между λ , (която има физическия смисъл на ефективен коефициент на размножение k_{eff}), и съставляващите на неутронния баланс:

$$k_{eff} = \frac{\int dE \int d^3r \Sigma_v(r,E) \Phi(r,E)}{\int dE \int d^3r \Sigma_a(r,E) \Phi(r,E) + \int dE \oint ds J(r_s,E)} \quad (2)$$

$J(r,E)$ в уравнението е нетният (резултантен) ток [4]:

$$J(r,E) = \int j(r,E,\Omega) d\Omega = \int \Omega \phi(r,E,\Omega) d\Omega \quad (3)$$

Ефективният коефициент на размножение k_{eff} се определя като отношението между общия брой неутрони, образувани при делене, и общия брой неутрони, загубени вследствие на поглъщане и утечка от системата. Тъй като k_{eff} характеризира неутронния баланс на реактора като цяло, за оценка на локални размножаващи свойства на реакторна среда се въвежда коефициентът на размножение в безкрайна среда k_{∞} , при който не се отчитат загубите на неутрони вследствие на утечка:

$$k_{\infty} = \frac{\int dE \int d^3r \Sigma_v(r,E) \Phi(r,E)}{\int dE \int d^3r \Sigma_a(r,E) \Phi(r,E)} \quad (4)$$

Пространственото интегриране е по обема на характерен участък (реакторна клетка). В този случай k_{∞} описва размножаващите свойства на безкрайна решетка от такива клетки, [4].

Условнокритичното уравнение намира приложение за решаването на два основни типа задачи.

При първия тип състоянието на реактора се задава предварително (и е фиксирано), а в резултат от решаването на уравнението се определя съответната стойност на ефективния коефициент на размножение k_{eff} .

При втория тип задача се търси критично състояние на реактора, за което $k_{eff}=1$. Това се постига чрез изменение на определени свойства на средата, като концентрация на поглъстител в забавителя и горивото, размер и форма на активната зона и др.

От израз (2) можем да съдим, че при $k_{eff}>1$ балансът от скоростите на реакции е в полза на приходите на неутрони спрямо загубите, а при $k_{eff}<1$ ще намаляват. Тоест при $k_{eff}>1$ реакторът ще е надкритичен, а при $k_{eff}<1$ подкритичен.

Ефективният коефициент на размножение на реактора може да се запише по следния начин, [2]:

$$k_{eff} = k_{\infty} P_f P_{th}$$

Където:

$$k_{\infty} = \epsilon p f n$$

Коефициентът на размножение на безкрайна решетка от горивни елементи (т.е. на една елементарна клетка, съставена от гориво и забавител), представен чрез разгледаните по-горе четири множителя, [2].

Множителят p е вероятност за избягване на резонансно залавяне. **Множителят ϵ** е пълният брой неутрони от делене, отнесен към броя, дължащ се на делене с топлинни неутрони. Този множител е известен като коефициент на размножение на надтоплинните неутрони. **Множителят η** се нарича коефициент на размножение с топлинни неутрони. **Множителят f** е известен като коефициент на използване на топлинните неутрони.

P_f е вероятността за избягване на утечка на бързи неутрони в процеса на забавянето им,

P_{th} е вероятността за избягване на утечка на топлинни неутрони в процеса на дифузията им.

Реактивността е основна неутроннофизична характеристика, която определя отклонението на реактора от критичното състояние. Ясно е, че критичният реактор е с нулева реактивност, подкритичният – с отрицателна, а надкритичният – с положителна, от което следва, [4]:

$$\rho = \frac{keff-1}{keff} \quad (5)$$

Стойността на реактивността, съответно и $Keff$ зависят от редица технологични параметри, сред които температурата и плътността на топлоносителя, температурата на горивото, топлинната мощност, концентрацията на борна киселина, положението на органите за регулиране, дълбочина на изгаряне на ядреното гориво и др.

4. Коефициенти и ефекти на реактивността

Коефициентът на реактивност по даден параметър α показва изменението на реактивността при изменение на този параметър, когато всички останали параметри се запазват постоянни:

$$c_\alpha = \left. \frac{\partial \rho}{\partial \alpha} \right|_{\beta, \gamma, \delta \dots = const} \quad (6)$$

Тази величина характеризира изменението на реактивността при единична промяна на съответния параметър.

Знакът на коефициента показва посоката на изменение на реактивността. При положителен коефициент нарастването на параметъра води до увеличаване на реактивността, а при отрицателен – до нейното намаляване.

При промяна на параметъра α от стойност α_1 до α_2 , при постоянни стойности на останалите параметри, съответното изменение на реактивността представлява реактивностния ефект по параметъра α :

$$\Delta \rho_\alpha = \rho(\alpha_2) - \rho(\alpha_1) = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} c_\alpha(\alpha) d\alpha$$

(7)

Когато c_α зависи слабо от параметъра α , или при неголеми изменения на α , **реактивностният ефект** може да се оцени чрез израза:

$$\Delta\rho_\alpha \cong (\alpha_2 - \alpha_1) \times c_\alpha \left(\frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} \right) \quad (8)$$

И обратно, при тези условия **коэффициентът на реактивност** може да се оцени чрез отношението:

$$c_\alpha \left(\frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} \right) \cong \frac{\Delta\rho_\alpha}{\Delta\alpha} \quad (9)$$

Основните коефициенти, използвани при анализа на състоянието на активната зона са:

Коефициент на реактивност по температура на топлоносителя:

Коефициентът на реактивност по температура на забавителя (топлоносителя), $\partial\rho/\partial t_m$, отчита както чистия температурен коэффициент на реактивност, така и ефекта от изменението на плътността на топлоносителя, [1]:

$$\frac{\partial\rho}{\partial t_m} = \frac{\partial\rho}{\partial t_{*m}} + \left(\frac{\partial\rho}{\partial\gamma_m} \right) \left(\frac{\partial\gamma_m}{\partial t_m} \right) \quad (10)$$

$\partial\rho/\partial t_{*m}$, отчита ефекта от топлинното движение на ядрата на изотопите в забавителя (топлоносителя) върху микросеченията на взаимодействие на неутроните с тези изотопи, без да отчита изменението на плътността на топлоносителя. В литературата този коэффициент се нарича ядрен температурен коэффициент на реактивност. Този коэффициент на реактивност отчита и ефекта от температурното движение на ядрата на топлоносителя върху спектъра на топлинните неутрони [$\text{pcm}/^\circ\text{C}$], [1]

Коефициентът на реактивност по плътност на топлоносителя, $\partial\rho/\partial\gamma_m$ [$\%/g/cm^3$], отчита ефекта от изменението на концентрациите на всички изотопи в топлоносителя вследствие на изменението на неговата плътност. Известно е, че водоурановото отношение при реакторите ВВЕР е избрано така, че коэффициентът на реактивност по плътност да е силно положителен, т.е. при увеличаване на плътността на топлоносителя реактивността да нараства. Тъй като $\partial\gamma_m/\partial t_m$ е винаги отрицателна, положителен коэффициент на реактивност по плътност означава отрицателна съставляваща $(\partial\rho/\partial\gamma_m)(\partial\gamma_m/\partial t_m)$ в температурния коэффициент на реактивност. [1]

Добавянето на борна киселина в топлоносителя внася отрицателен принос в плътностния коэффициент на реактивност, защото при увеличаване на плътността на топлоносителя се увеличава обемната концентрация на борната киселина, а това води до намаляване на реактивността.

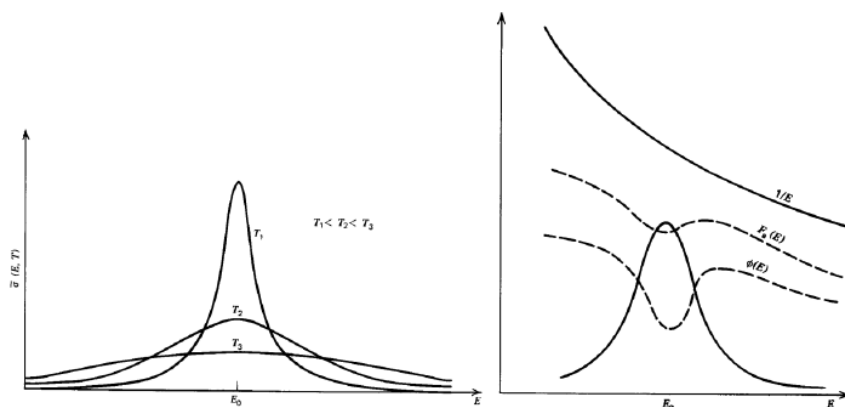
Поради това стойността и знакът на коэффициента зависят от състоянието на активната зона и от концентрацията на борна киселина. [1]

Коефициент на реактивност по топлинна мощност

$\partial\rho/\partial N_T$ – коефициентът отчита влиянието на изменението на мощността върху средната температура на горивото по обема на активната зона, както и върху температурата на топлоносителя в активната зона, при постоянна температура на топлоносителя на входа на активната зона, отравяне и изгаряне. [pcm/MW]

Температурният коефициент на реактивност на горивото $\partial\rho/\partial T_f$ [$\text{pcm}/^\circ\text{C}$] отчита влиянието на изменението на температурата на горивото върху реактивността. То включва промяна на плътността и геометричните размери на горивото, както и Доплеровото разширение на резонансите. Като най-значителен е Доплеровият ефект.

При Доплеровия ефект увеличаването на температурата на средата води до разширяване на резонансите, при което площта под тях се запазва: $\int \sigma(E)dE = \text{const}$, [4].



Фиг. 1 Температурно разширяване на резонансите. Ефект върху неутронния поток във вътрешността на горивния блок при хетерогенен реактор, [4].

С нарастване на температурата на горивото нараства и доплеровото разширение на резонансите на неутронно залавяне от ^{238}U , което при хетерогенните реактори води до общо нарастване на поглъщането на резонансни неутрони в горивния блок. Доминиращ е, защото ^{238}U има много по-голяма концентрация от останалите тежки изотопи. Нарастването на температурата на забавителя води до втвърдяване на неутронния спектър т.е. средната енергия на неутроните се увеличава (пряко и чрез намаляване на плътността на забавителя).

Коефициент на реактивност по концентрация на борна киселина

$\partial\rho/\partial \text{C}_{\text{H}_3\text{BO}_3}$ – характеризира изменението на реактивността при промяна на концентрацията на борна киселина при постоянна мощност, температура на горивото, отравяне и изгаряне. [$\%/g/kg$]

Реактивностният ефект от въвеждане на органите за регулиране (ОР СУЗ)

При ВВЕР-1000 в 61 от общо 163-те горивни касети могат да се въвеждат снопове (кластери) от поглъщащи пръти. Поглътителят е прахообразен борен карбид (B_4C) в цилиндрична обвивка от неръждаема стомана. В долната част на поглъщащия стълб се използва диспрозиев титанат $\text{Dy}_2\text{O}_3 \cdot \text{TiO}_2$. Прилагането на този материал позволява да се увеличи експлоатационният ресурс на ПЕЛ, тъй като при поглъщането на неутрони от изотопите на Dy не се отделя хелий, за разлика от реакциите с ^{10}B , [4].

Ролята на регулиращите пръти е:

- Автоматично и ръчно регулиране, т.е. поддържане на мощността на реактора на зададено ниво или промяна на нивото на мощност
- Бързо и надеждно прекратяване на верижната реакция на делене при възникване на аварийна ситуация или енергийно установяване, [2].

Реактивностният ефект от органите за регулиране се дължи на увеличаването на поглъщането на неутрони при въвеждането на поглъщащите пръти в активната зона. В резултат на това ефективният коефициент на размножение намалява, което води до въвеждане на отрицателна реактивност. Освен това води и до преразпределение на неутронния поток по обема на активната зона и по енергии, което оказва допълнително влияние върху реактивността. За оценка на ефективността на прътите се използват неутроннофизични пресмятания при различни дълбочини на изгаряне, концентрация на борна киселина и др., а при пускови операции след ПГР-и чрез изпитания.

Ефективността на ОР СУЗ е най-голяма в областите с максимална плътност на неутронния поток.

Ефективността на регулиращите пръти се определя от разпределението на неутронния поток в активната зона и от положението им спрямо областите с максимална плътност на потока. Поради това имаме зависимост от температурата на топлоносителя, концентрацията на борна киселина (интерференция на поглъстителите) и дълбочината на изгаряне на горивото.

Реактивностният ефект на регулиращите пръти е най-силен в областите с по-висока плътност на неутронния поток, като приближено зависимостта може да се представи чрез, [4]:

$$\Delta\rho(r) \propto \Phi^2(r) \quad (11)$$

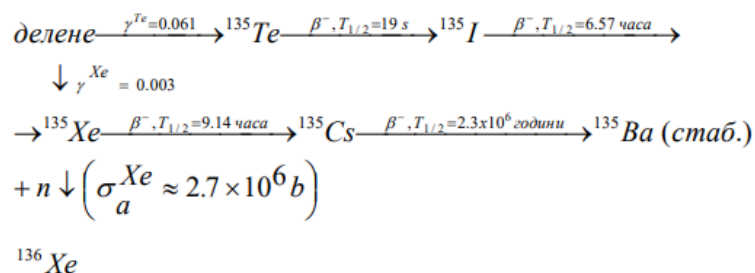
При едновременното въвеждане на няколко регулиращи пръта възниква интерференция. Всеки въведен поглъстител изменя локалното разпределение на неутронния поток и по този начин влияе върху ефективността на останалите. Поради това общият реактивностен ефект на група пръти не може да се разглежда като проста сума от ефектите на отделните пръти. С увеличаване на разстоянието между тях интерференцията отслабва, а общата им ефективност се увеличава и се доближава до сумата от индивидуалните им ефективности.

Интегралната ефективност характеризира общото изменение на реактивността между две положения на пръта или групата $\rho(h_{\max}) - \rho(h_{\min})$, а диференциалната ефективност е изменението на реактивността при единица изменение на височината на пръта $d\rho/dh$.

5. Ксенонови процеси в активната зона

При изгаряне на ядреното гориво се натрупват продукти на делене, някои от които с много голямо сечение на поглъщане на топлинни неутрони. Натрупването на такива нуклиди в активната зона води до намаляване на коефициента на размножение. Този процес се нарича отравяне на реактора. От всички продукти на деленето ^{135}Xe има най-голямо значение за критичността и управлението на реактора. При енергия на неутроните 0,025 eV неговото сечение за поглъщане е приблизително 2.72×10^6 b, [1]. Поради тази причина дори малки изменения в концентрацията на ^{135}Xe оказват съществено влияние върху реактивността на реактора.

Основната верига на получаване на ^{135}Xe :



Фиг. 2 Вери́га на образуване на ${}^{135}\text{Xe}$, [4].

На фигура 2 е представена схемата на образуване и разпад на ${}^{135}\text{I}$ и ${}^{135}\text{Xe}$. Основната част от ${}^{135}\text{Xe}$ се получава от ${}^{135}\text{I}$ с период на полуразпад 6.57 ч. Поради краткия период на полуразпад на ${}^{135}\text{Te}$ неговият принос обикновено се отчита към добива на ${}^{135}\text{I}$, поради което телуруът не се разглежда като отделен нуклид при решаването на балансите уравнения.

Полученият ${}^{135}\text{Xe}$ има период на полуразпад приблизително 9.14 ч. и намалява както вследствие на радиоактивен разпад до ${}^{135}\text{Cs}$, така и чрез поглъщане на неутрони, при което се превръща в стабилния изотоп ${}^{136}\text{Xe}$. ${}^{135}\text{Cs}$ е практически стабилен (период на полуразпад 2.3 милиона години) и затова не се отчита при анализа на процесите на делене.

${}^{135}\text{Xe}$ се образува по два основни канала:

1. Директно при деленето на ядреното гориво.
2. Вследствие на радиоактивния β -разпад на ${}^{135}\text{I}$.

Директният добив на ${}^{135}\text{Xe}$ е сравнително малък от порядъка на няколко десети от процента (0.3%), [1], но фактически той има доста различаващи се добиви при делене на различни нуклиди. Много по-голяма скорост на генериране ${}^{135}\text{Xe}$ има от разпада на ${}^{135}\text{I}$, [1].

Освен при деленето на U-235, ${}^{135}\text{Xe}$ се образува и при деленето на останалите нуклиди в активната зона като - U-238, Pu-239, Pu-240, Pu-241, Pu-242, Am-241. Добивите на ${}^{135}\text{Xe}$ и на ${}^{135}\text{I}$ за отделните изотопи са различни. С напредване на кампанията концентрацията на U-235 намалява, а на Pu-239 се увеличава, при което се изменя и добива на ${}^{135}\text{Xe}$ в активната зона.

Таблица 1: Добиви { % } на йод-135 и ксенон-135 от деленето на различни изотопи/ нуклиди, [1]

	U-235	U-238	Pu-239	Pu-240	Pu-241	Pu-242	Am-241
I-135	6.28071	6.61960	6.53848	6.54054	6.94313	6.73436	4.95745
Xe-135	0.25765	0.09574	1.06881	0.63905	0.22691	0.17265	1.73469
Сума	6.53836	6.71534	7.60729	7.17959	7.17004	6.90701	6.69214

Връзка отравяне - реактивност

Натрупването на шлаки, т.е. продукти от деленето, и на отровители практически не оказва влияние върху R_f . Това се обяснява както с относително малката им концентрация, така и с факта, че те се натрупват предимно в горивната област, докато забавянето на неутроните протича основно в забавителя. Влиянието им върху R_{th} също може да се приеме за пренебрежимо. Причината е, че дифузионната дължина на топлинните неутрони във воден забавител е сравнително малка — около 4–5 cm — спрямо характерните размери на активната зона на големите енергийни реактори, [2].

Влиянието на отравянето върху k_{∞} се проявява чрез изменението на коефициента на използване на топлинните неутрони f :

$$f = \Sigma_f \Phi_1 / (\Sigma_f \Phi_1 + \Sigma_m \Phi_0 + \Sigma_b \Phi_0 + \Sigma_p \Phi_1)$$

(12)

$\Sigma_f, \Sigma_m, \Sigma_b, \Sigma_p$, са означени съответно сеченията на поглъщане на топлинни неутрони в горивото, забавителя, регулиращите пръти и отровителите.

f е коефициентът за използване на топлинните неутрони за неотровено състояние на реактора при зададена начална стойност на Σ_p , а f' ще е при отровено състояние и идентични други условия, [2].

K_{eff} и k'_{eff} са съответните коефициенти на размножение при неотровено и отровено състояние. Тогава относителното изменение на k_{eff} поради отравяне на реактора ще е:

$$\rho_p = \frac{k'_{eff} - k_{eff}}{k_{eff}} = \frac{f' - f}{f} = \frac{q_p}{1 + q_m + q_b + q_p}$$

(13)

Горният израз е въведена от отровителите реактивност ρ_p . Величините q_j са $\Sigma_a \Phi_j / \Sigma_U \Phi_1$; $j = 0, 1$. Шлакуването и отравянето обикновено се представят в единици Σ_U , т.е. като q_p . Поради малките стойности на величините в знаменателя спрямо 1, при приближено определяне на реактивностния ефект от отравянето те могат да бъдат пренебрегнати. За опростяване на оценката се приема, че потокът на топлинни неутрони в отровителя е приблизително равен на този в горивото, [2].

Реактивността, въведена от ^{135}Xe се определя чрез пресмятане на изменението на неговата концентрация в активната зона за всеки разглеждан интервал от време. Концентрациите на ^{135}I и ^{135}Xe се определят чрез решаване на система от диференциални уравнения. Първото уравнение отчита образуването на ^{135}I при делене и изчезването му вследствие на радиоактивния разпад. Второто уравнение отчита образуването на ^{135}Xe при делене и образуването му вследствие на разпадането на ^{135}I , както и изчезването му вследствие на радиоактивен разпад и поглъщане на неутрони.

$$\begin{aligned} \frac{dI}{dt}(t) &= \gamma_I \Sigma_f \Phi - \lambda_I I(t) \\ \frac{dXe}{dt}(t) &= \gamma_{Xe} \Sigma_f \Phi + \lambda_I I(t) - \sigma_{Xe} \Phi Xe(t) - \lambda_{Xe} Xe(t) \end{aligned}$$

(14)

Където:

- γ_I – добив на образуване (вероятности на получаване) на ^{135}I при едно делене на U-235
- γ_{Xe} – добив на образуване (вероятност за получаване) на ^{135}Xe при едно делене на U-235
- λ_{Xe} – константа на разпад на Xe -135 (s^{-1})
- λ_I – константа на разпад на I -135 (s^{-1})
- Σ_f – макроскопично сечение за делене на U-235 (cm^{-1})
- σ_{Xe} – микроскопично сечение за поглъщане на неутрони от ^{135}Xe (barn)
- $\Phi(t)$ – скаларен поток в зависимост от времето ($cm^{-2} s^{-1}$)

В първото уравнение образуването на I -135 в резултат на деленето се отчита чрез първия член, докато чрез втория член се представя намаляването на концентрацията му вследствие на радиоактивен разпад.

В уравнението за ^{135}Xe се отчитат както източниците на ксенон (първи и втори член), така и механизмите за неговата загуба (трети и четвърти член).

При условие че добивите на I-135 и ^{135}Xe от делене, микроскопичното сечение за поглъщане на ^{135}Xe и плътността на скоростта на делене остават постоянни, системата диференциални уравнения има следните решения:

$$I(t) = I_0 \exp(-\lambda_I t) + \frac{\gamma_I \Sigma_f \Phi}{\lambda_I} (1 - \exp(-\lambda_I t)) \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \text{Xe}(t) = & \text{Xe}_0 \exp(-(\lambda_{\text{Xe}} + \sigma_{\text{Xe}} \Phi)t) + \frac{(\gamma_I + \gamma_{\text{Xe}})}{\lambda_{\text{Xe}} + \sigma_{\text{Xe}} \Phi} (1 - \exp(-(\lambda_{\text{Xe}} + \sigma_{\text{Xe}} \Phi)t)) \\ & + \frac{\gamma_I \Sigma_f \Phi - \lambda_I I_0}{\lambda_{\text{Xe}} + \sigma_{\text{Xe}} \Phi - \lambda_I} (\exp(-(\lambda_{\text{Xe}} + \sigma_{\text{Xe}} \Phi)t) - \exp(-\lambda_I t)) \end{aligned} \quad (16)$$

С I_0 и Xe_0 са означени началните концентрации на йод-135 и ксенон-135. Така се определят неравновесните концентрации на двата нуклида. Във всеки интервал на пресмятане може да се приеме, че потокът и сеченията са постоянни. Добивите на ^{135}I и ^{135}Xe от делене също се изменят, но тази промяна протича сравнително бавно с изгарянето на ядреното гориво.

Равновесно отравяне от ксенон

Равновесната концентрация на ^{135}I и ^{135}Xe в активната зона се достига след продължителна работа на реактора при постоянна мощност, без съществено преместване на ОР СУЗ. Равновесната концентрация на ^{135}I се получава от уравнение (15) по зависимостта:

$$I_{\infty} = \frac{\gamma_I \Sigma_f \Phi}{\lambda_I} \quad (17)$$

Времето за установяване на равновесната концентрация на ^{135}I може да се оцени чрез експоненциалния член в зависимостта. След интервал, равен на около пет периода на полуразпад, т.е. приблизително 33 часа, стойността на $\exp(-\lambda_I t)$ намалява до около 0,03. Това означава, че отклонението от равновесната концентрация е приблизително 3%, [1].

Равновесната концентрация на ксенона е:

$$\text{Xe}_{\infty} = \frac{(\gamma_I + \gamma_{\text{Xe}}) \Sigma_f \Phi}{\lambda_{\text{Xe}} + \sigma_{\text{Xe}} \Phi} \quad (18)$$

При малки стойности на потока ($\sigma_{\text{Xe}} \Phi \ll \lambda_{\text{Xe}}$) тази концентрация ще расте практически линейно с потока, а при големи ($\sigma_{\text{Xe}} \Phi \gg \lambda_{\text{Xe}}$) ще достигне насищане. За $\sigma_{\text{Xe}} \approx 2.5 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$ и $\lambda_{\text{Xe}} \approx 2.1068 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ равенство между двете събираеми в знаменателя на (18) се получава при $\Phi = \lambda_{\text{Xe}} / \sigma_{\text{Xe}} = 8.4 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, [4].

Йодна яма

След понижаване на мощността или спиране на реактора концентрацията на ^{135}Xe може временно да нарасне, което води до увеличаване на ксеноновото отравяне. Това нарастване се нарича – йодна яма. След намаляване на неутронния поток скоростта на изгаряне на ^{135}Xe от поглъщане на неутрони също намалява, докато натрупаният от предходната мощност ^{135}I продължава да се разпада и да образува ^{135}Xe т.е равновесието между натрупване и загуба на ксенон е нарушено в полза на натрупването, след което се установява ново равновесно състояние.

Обратното се наблюдава при повишаване на мощността. Нарастването на неутронния поток, от своя страна води до увеличено изгаряне на ^{135}Xe , докато концентрацията на ^{135}I все още съответства на предходната по-ниска мощност. Равновесието е нарушено в полза на загубата. От връзката между отравяне – реактивност можем да съдим, че това води първоначално до закъсняваща положителна обратна връзка по мощност. Впоследствие, с установяването на новите концентрации на ^{135}I и ^{135}Xe , системата се стреми към ново равновесно състояние.

При продължителна работа на реактора на постоянна мощност се установяват равновесни концентрации на ^{135}I и ^{135}Xe . При преминаване към ново постоянно ниво на мощност това равновесие се нарушава и започва преходен ксенонов процес. При увеличаване на мощността равновесната концентрация на ^{135}I нараства, като преминаването към новата равновесна стойност протича постепенно по експоненциален закон. За проследяване на изменението на концентрацията на ^{135}I във времето уравнение (15) може да бъде представено в следния вид:

$$I(t) = \frac{\gamma_I \Sigma_f \Phi}{\lambda_I} - \left(\frac{\gamma_I \Sigma_f \Phi}{\lambda_I} - I_0 \right) \exp(-\lambda_I t) \quad (19)$$

След промяната на мощността концентрацията на ^{135}I постепенно се приближава към новата си равновесна стойност, като отклонението от нея намалява експоненциално. Характерното време на този процес се определя от времето на живот на ^{135}I . Ако новата равновесна концентрация се обозначи с $I(t_1)$ може да бъде записана във вида:

$$I(t) = I(t_1) - (I(t_1) - I_0) \exp(-\lambda_I t) \quad (20)$$

Аналогично преобразование може да се приложи и към уравнение (16), където $Xe(t_1)$ е новата равновесна концентрация:

$$\begin{aligned} Xe(t) = & Xe(t_1) - (Xe(t_1) - Xe_0) \exp(-(\lambda_{Xe} + \sigma_{Xe} \Phi) t) \\ & + \frac{\lambda_I (I(t_1) - I_0)}{\lambda_{Xe} + \sigma_{Xe} \Phi - \lambda_I} (\exp(-(\lambda_{Xe} + \sigma_{Xe} \Phi) t) - \exp(-\lambda_I t)) \end{aligned} \quad (21)$$

При пренебрегване на последния член изменението на концентрацията на ксенона би имало подобно поведение с това на йод-135 от предходното уравнение. Наличието на последния член обаче изменя тази зависимост и усложнява поведението на ксеноновата концентрация. Отношението

$$(\exp(-(\lambda_{Xe} + \sigma_{Xe} \Phi) t) - \exp(-\lambda_I t)) / (\lambda_{Xe} + \sigma_{Xe} \Phi - \lambda_I)$$

запазва отрицателен знак, тъй като при по-голяма стойност на едната величина съответната експоненциална функция има по-малка стойност и обратно. В началния момент $t=0$ двете експоненти са равни на единица, поради което разликата между тях е нула. С нарастване на времето тази разлика първоначално се увеличава по абсолютна стойност и достига максимална стойност, след което започва да намалява. При достатъчно големи стойности на t експонентите клонят към нула и съответно разглежданият израз също се стреми към нула

Дълбочината на йодната яма се определя в голяма степен от мощността, на която реакторът е работил преди спирането. При по-висока начална мощност равновесната концентрация на ^{135}I е по-голяма, вследствие на което след спирането се образува по-голямо количество ^{135}Xe . Това води до по-дълбоко ксеноново отравяне и до значително намаляване на реактивността. Началното ниво на мощността оказва влияние и върху момента на достигане на максимална концентрация на ^{135}Xe , защото колкото по-висока е равновесната концентрация на ^{135}I , толкова по-бавно се достига до максималното отравяне от ксенон.

Изменението на концентрациите на ^{135}I и ^{135}Xe не протича еднакво във всички части на активната зона. В отделните подобласти има различни концентрации на ксенон и йод. Те се определят от локалните стойности на неутронния поток, сечението на поглъщане и добивите от деленето. Установяването на новото равновесно състояние зависи основно от времената на живот на ^{135}I и ^{135}Xe , като слабо влияние оказва и изходната мощност. За практически оценки може да се приеме, че период от около три денонощия е достатъчен за достигане на новото равновесно състояние на отравяне.

Равновесното ксеноново отравяне се определя от състоянието на активната зона и режима на работа. Поради това то се различава в отделните етапи на горивната кампания, както и при преходи, свързани с повишаване или понижаване на мощността.

При реални експлоатационни процеси, свързани с изменение на мощността, компенсирането на реактивността от ксеноновите колебания се осъществява чрез изменение на ОР СУЗ и концентрацията на борната киселина в първи контур, при осъществяване на контрол на АО и спазване на изискванията за ТКР.

Ксенонови колебания

Аксиалният офсет се използва за характеризиране на разпределението на мощността по височината на активната зона:

$$AO = \frac{\Phi_d - \Phi_r}{\Phi_d + \Phi_r}$$

Φ – неутронен поток,

В израза за неговото определяне индексите r и d се отнасят съответно за горната и долната част на зоната. Стойността на офсата обикновено се представя в проценти, като положителен знак съответства на по-голяма мощност в долната половина на активната зона. При установен режим на постоянна мощност АО достига определена стационарна стойност, а при изменение на мощността се изменя и неговата стойност, [2].

При изменение на мощността на реактора се изменя подгряването на топлоносителя, а с това и разпределението на неговата плътност по височината на активната зона. При повишаване на мощността температурната разлика между долната и горната част на зоната нараства, което предизвиква промяна на аксиалния офсет в положителна посока. В началото на ксеноновия преходен процес този ефект може допълнително да нарасне вследствие на преразпределението на концентрацията на ^{135}Xe . С развитието на процеса посоката на изменение на офсата може да се обърне. По този начин се създават условия за възникване на

аксиални ксенонови колебания дори без допълнително въздействие върху разпределението на мощността чрез преместване на ОР СУЗ.

Ксеноновите колебания се изразяват в периодично преместване на енергоотделянето по височината на активната зона, при което натоварването последователно се измества между нейната горна и долна част. При реакторите ВВЕР-1000 този процес се проявява основно в аксиално направление поради голямата плътност на неутронния поток и значителния размер на активната зона: по-голям от 30 дължини на миграция на неутроните. При реактори с по-голям диаметър на активната зона е възможно да се развият и радиални колебания, [2].

При реакторите с големи активни зони ксеноновите колебания са свързани с несъответствие между разпределението на енергоотделянето и разпределението на ^{135}I и ^{135}Xe при поддържане на постоянна мощност. Такъв дисбаланс се получава в резултат на изменение на мощността на реактора с над 10/20 % от номиналната или преместване на работната група с над 3% спрямо средното стационарно положение за време над 1 час, [2]. Най-неблагоприятен фактор, водещ до възникване на ксенонови колебания, е продължителното задържане на групите ОР СУЗ в диапазона 40–60% за повече от 0,5–1,0 часа. Ксенонови колебания могат да възникнат при намаление на мощността, включително сработване на УРБ, намаление с последващо възстановяване на мощността, увеличение на мощността, [2].

В края на горивната кампания възникващите при номинална мощност аксиални ксенонови колебания във ВВЕР-1000 могат да бъдат компенсирани чрез автоматичния регулатор на мощността (АРМ). Това е свързано, от една страна със зависимостта между изменението на пълната мощност и аксиалния офсет. В края на кампанията размножаващите свойства в долната част на активната зона са намалели (поради по-интензивното изгаряне), което премества натоварването в горната част на активната зона (което води и до по-голямо отравяне) и до изместване на аксиалния офсет. За компенсиране на това нарастване АРМ автоматично противодейства на ксеноновото колебание, като спуска група ОР СУЗ.

6. Борно регулиране

Борната киселина въздейства по аналогичен начин на ефекта от шлакуването на горивото от продукти на деленето. Сечението на поглъщане на топлинни неутрони (0.025 eV) на ^{10}B е 4000b по реакцията $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$, [2].

Използването на борна киселина позволява промяна на реактивността без съществено локално изкривяване на неутронния поток, тъй като разтвореният бор е разпределен в целия топлоносител. Друго предимство е възможността концентрацията му да се изменя в широк интервал, което позволява компенсиране на значителни изменения на реактивността.

Количеството борна киселина се характеризира с нейната концентрация за инженерни цели C_{BA} в (g/kg) грамове борна киселина в един килограм разтвор, а за целите на реакторния анализ се представя като масова концентрация в грамове бор (природна смес) на килограм топлоносител C_{B} (g/kg), като връзката между тях е $C_{\text{BA}} = 5.72 \cdot C_{\text{B}}$. Коефициентът 5.72 произтича от отношението между моларната маса на борната киселина и масата на съдържащия се в нея бор [1].

Моларната маса на борната киселина H_3BO_3 :

$$M(\text{H}_3\text{BO}_3) = 3 \times 1.008 + 10.81 + 3 \times 16 = 61.83$$

(22)

Маса на бора в една молекула:

$$M(B) = 10.81 \text{ g/mol}$$

Следователно:

$$\frac{M(H_3BO_3)}{M(B)} = \frac{61.83}{10.81} = 5.72 \quad (23)$$

Тоест 1 g бор се съдържа в приблизително 5.72 g борна киселина.

При реакторни пресмятания се използва обемна концентрация на бор – C_B^v , тъй като скоростите на неутронните реакции се определят за единица обем от активната зона, а не спрямо единица маса.

$$C_B \times \rho_m = C_B^v \text{ (mg/cm}^3\text{)} \quad (24)$$

C_B – *тегловната концентрация (mg/g)*
 ρ_m – *плътността на топлоносителя (g/cm³)*

С повишаването на температурата ефективността на разтворимия бор намалява. Това се дължи на намаляването на плътността на водата и съответно на концентрацията на ядрата на ^{10}B в единица обем. Допълнително влияние оказва температурната зависимост на микроскопичното сечение за поглъщане σ_a , което е приблизително обратно пропорционално на корен квадратен от абсолютната температура: $\sigma_a \sim \frac{1}{\sqrt{T}}$

В хода на горивната кампания ефективността на ^{10}B постепенно се понижава вследствие на неговото изгаряне. Този ефект се компенсира чрез добавяне на свежа борна киселина към топлоносителя и едновременно извеждане на част от разтвора, съдържащ изгорял бор.

Върху ефективността на разтворимия бор влияние оказва и ксеноновото отравяне. Наличието на ^{135}Xe води до конкуренция с ^{10}B при поглъщането на топлинни неутрони, поради което изменението на концентрацията на единия поглъстител се отразява върху ефективността на другия. От своя страна, увеличаването на борната концентрация намалява относителното влияние на ^{135}Xe върху реактивността.

При наличие на равновесна концентрация на ^{135}Xe ефективността на разтворимия бор може да бъде по-висока в сравнение със състояние без ксеноново отравяне. Това не означава, че ^{135}Xe непосредствено усилва действието на бора. Причината е, че при равновесен ксенон критичното състояние се поддържа при по-ниска концентрация на борна киселина.

За борната киселина също се дефинират интегрална и диференциална ефективност. Пълната интегрална ефективност при изменение от C_{BA1} до C_{BA2} е разликата в реактивностите за второто и първото състояния на активната зона:

$$\rho(C_{BA2}) - \rho(C_{BA1})$$

Докато диференциалната ефективност се дефинира аналогично: изменение на реактивността за единица изменение на концентрацията на бора $\frac{d\rho}{dC_{BA}} \text{ (}/(g/kg)\text{)}$

Поради разликата в температурата на топлоносителя по височина в активната зона, то и обемната борна концентрация е различна.

При висока концентрация на борна киселина (както е в началото на кампанията) температурният коефициент на реактивност (ТКР) може да придобие положителна стойност. В този случай повишаването на температурата предизвиква нарастване на реактивността и съответно на мощността, което от своя страна води до допълнително повишаване на температурата. Подобна положителна обратна връзка е неблагоприятна от гледна точка на безопасността, поради което при експлоатацията на реактора е задължителен отрицателен ТКР.

Концентрацията на борна киселина е най-голяма в началото на горивната кампания, когато запасът от реактивност е висок, а ксеноновото отравяне все още не е достигнало равновесната си стойност. За компенсиране на излишната реактивност се поддържа по-висока концентрация на борна киселина. С напредването на горивната кампания и изгарянето на горивото необходимостта от компенсиране на излишната реактивност намалява, поради което концентрацията на борна киселина в топлоносителя постепенно се понижава.

7. Баланс на реактивността

Критичното състояние на реактора се характеризира с равенство между положителните и отрицателните реактивностни ефекти, при което сумарната реактивност е равна на 0 ($\rho=0$).

В общия случай реактивностният баланс включва запасната реактивност, ефекта от борна киселина, ефекта от ОР СУЗ, температурните ефекти, мощностния ефект и ефекта от ксеноново отравяне. В зависимост от режима на работа част от тези ефекти могат да отсъстват или да бъдат пренебрегнати.

$$\rho_{\text{зап}}(t) + \rho_{\text{HЗВ03}} + \rho_{\text{СУЗ}} + \rho_{\text{T}} + \rho_{\text{N}} + \rho_{\text{ХЕ}} = 0 \quad (25)$$

- $\rho_{\text{зап}}$ - запасна реактивност
- $\rho_{\text{HЗВ03}}$ – реактивност, внесена от промяната на концентрацията на борна киселина в реактора
- $\rho_{\text{СУЗ}}$ – реактивност, внесена в реактора от промяната на положението от групи ОРСУЗ
- ρ_{T} - реактивност внесена от промяната на входната температура на топлоносителя, предизвикана от промяна на мощността
- $\rho_{\text{МЕ}}$ – реактивност, внесена от промяната на мощността на реактора
- $\rho_{\text{ХЕ}}$ – ефект от промяната на концентрацията на ^{135}Xe в реактора

След представяне на общия реактивностен баланс се приема, че реактивностният ефект от всеки параметър е пропорционален на изменението на съответния параметър и неговия коефициент на реактивност. За всеки параметър α е валидна зависимостта:

$$\Delta\rho_{\alpha} = \Delta\alpha \cdot c_{\alpha} \quad (26)$$

Където $\Delta\alpha = \alpha_1 - \alpha_2$ е изменението на параметъра α , а както е споменато по-горе:

$$c_{\alpha} = \frac{\partial \rho}{\partial \alpha} \quad (27)$$

е коефициентът на реактивност по този параметър.

След заместване на отделните реактивностни ефекти в общото уравнение на реактивностния баланс се получава:

$$\Delta C_{H3BO3} \frac{\partial \rho}{\partial C_{H3BO3}} + \Delta \rho_{СУЗ} + (N_{кр} - N_{нач}) \frac{\partial \rho}{\partial N} + (T_{кр}^{BX} - T_{нач}^{BX}) \frac{\partial \rho}{\partial t_{h20}} + \Delta \rho_{XE} = 0$$

(28)

$N_{кр}, T_{кр}^{BX}$ – са съответно топлинната мощност и входната температура на топлоносителя в активната зона след преходния процес

$N_{нач}, T_{нач}^{BX}$ – са съответно топлинната мощност и входната температура на топлоносителя в активната зона преди преходния процес

CriticalCalc

CriticalCalc представлява изчислителен модел за пресмятане на критичната борна концентрация (включително необходимото количество борна киселина/чист кондензат до достигането ѝ) и реактивността от ксенонови процеси при преходни режими с изменение на мощността и/или положението на ОР СУЗ за реактори ВВЕР-1000. CriticalCalc е разработен на базата MS Excel.

Изчислителният модел осигурява:

- Изчисляване на реактивността от изменение на мощността на реактора (мощностен и температурен ефект) и/или положението на групи ОР СУЗ (I, IX, X група), в зависимост от:
 - Начална и крайна мощност;
 - Началното и крайното положение на групи ОР СУЗ;
 - Наличие или отсъствие на УРБ (ускорено разтоварване на блока); ефективността на IX и X група ОР СУЗ зависи от положението на; I група;
 - Брой работещи ГЦП;
 - Момент от кампанията;
- Автоматизирано изчисляване на реактивността от ксенон-135 при изменение на мощността на реактора в зависимост от:
 - Начална и крайна мощност;
 - Профил и скорост на изменение на мощността;
 - Момент от кампанията;
- Изчисленията се изпълняват за произволна (въведена от потребителя) скорост на промяна на мощността с възможност за моделиране на:
 - Времезадръжки на постоянна мощност
 - Промяна на посоката и скоростта на промяна на мощността.

Определянето на реактивността от изменението на съдържанието на Ксенон-135 се извършва както по време на развитие на моделирания процес на изменение на мощността, така и след неговото приключване и установяване на постоянна мощност (с цел определяне на необходимото

количество борна киселина за компенсиране на продължаващите ксенонови процеси). Нагледно това се осигурява чрез графично представяне на зависимостта на реактивността от ^{135}Xe от времето.

Програмата осигурява възможност за моделиране на поредица от времезависими процеси:

- Предварителната промяна на мощността, с въведена възможност за определяне на времето за осъществяване на тази промяна. Това е всяка промяна на мощността, която е била осъществена преди началото на моделирания процес (история на състоянието на реактора), и която е предизвикала изменение на концентрацията на ^{135}Xe от първоначалното му равновесно състояние
- Поддържане на постоянна мощност след първоначалната промяна за произволен период от време, с последваща повторна промяна на мощността с произволна (въведена от потребителя) скорост и посока (знак)
- Поддържане на постоянна мощност и/или промяна на скоростта и/или посоката (знака) на изменение на мощността при достигането ѝ до определена стойност, и последващо изменение на мощността със зададените посока и скорост след изтичане на времето на задръжката

Като краен резултат програмата представя:

- Критичната борна концентрация в края на процеса – в числен вид
- Критичната борна концентрация във всеки момент от време на развитието на процеса (във вид на графично и таблично представяне на зависимостта на концентрацията на борна киселина от времето)
- Общо количество борна киселина и/или ХОВ, което трябва да бъде въведено в реактора, за да се осигури необходимата критична концентрация. За целта е необходимо във входните данни да се определи концентрацията на борна киселина на въвеждания разтвор
- Промяна в нивото на разтвора в ТВ10В01 при въвеждане на борна киселина
- Количество борна киселина (с определена концентрация) и/или ХОВ, което трябва да бъде въвеждано в реактора през определен интервал от време, за да се осигури необходимата критична борна концентрация. Тук освен въведен обем за определен интервал от време ($\text{m}^3/\text{i min}$), се пресмята още:
 - Пресмятане на необходимото количество ХОВ, което трябва да се дозира в първи контур за всеки “i” минутен интервал ($\text{cm}^3/\text{i min}$).
 - Пресмятане на необходимото средно време за дозиране на разтвор на H_3BO_3 в първи контур за всеки “i” минутен интервал ($\text{s}/\text{i min}$). За целта е необходимо във входните данни да се определи дебита (m^3/h) на въвеждания разтвор.
- Пресмятане на необходимата средна промяна на положението на X и IX гр. ОРСУЗ за всеки “i” минутен интервал, при зададено начално и крайно положение при допускане за равномерни (линейно във времето) въвеждане на реактивност чрез ОРСУЗ
- Пресмятане на реактивността от изменение на концентрацията на ^{135}Xe за всеки “i” минутен интервал от време (графично представяне). Познаването на профила на реактивността от ксенонови процеси би било от полза на оператора за определяне на знака на вкарвана реактивност и момента от време, в който този знак би се обърнал.

HEX3D

Програмата HEX3D [3] е стационарна тримерна едроклетъчна и финоклетъчна двугрупова дифузионна програма за моделиране на неутроннофизичните процеси в активната зона на реакторите ВВЕР-1000. Тя е снабдена с библиотеки двугрупови дифузионни и кинетични параметри за едроклетъчното и финоклетъчното пресмятане и библиотеки с гранични условия за отражателите.

Настоящата версия на програмата HEX3D може да изпълнява 14 типа пресмятания, в зависимост от стойността на параметъра KINT:

- 1 Пресмятане на зададено състояние на активната зона.
- 2 Пресмятане на критично състояние без регулиране с бор, с групи органи за ОР СУЗ или с мощност.
- 3 Не се използва.
- 4 Пресмятане на преходен процес на ксенон.
- 5 Пресмятане на интегрална и диференциална ефективност на ансамбъл ОР СУЗ.
- 6 Избор на схеми за презареждане в диалогов режим (изисква графичен режим).
- 7 Пресмятане на изгарянето по схемата предиктор-коректор.
- 8 Сравнение на разчетни и експериментални разпределения на плътността на мощността.
- 9 Пресмятане на апроксимационни коефициенти за k_{eff} .
- 10 Моделиране на реален режим на работа на реактора.
- 11 Не се използва.
- 12 Пресмятане на коефициенти на реактивност.
- 13 Определяне на максимално ефективен ОР СУЗ.
- 14 Пресмятане на температурата на повторна критичност.
- 15 Пресмятане за осигуряване на режима ускорено разтоварване на блока.
- 16 Пресмятане за осигуряване на алгоритъма за регулиране на аксиалното разпределение на енергоотделянето.

Оценка на реактивността, дължаща се на изменението на концентрацията на ^{135}Xe при изменение на мощността:

В CriticalCalc $\Delta\rho_{Xe}$ – реактивността въведена от ксенон 135 се определя чрез пресмятане на изменението на концентрацията на ксенон-135. Това става чрез решаване на диференциални уравнения (14).

С течение на кампанията концентрацията на U-235 намалява, докато в активната зона се натрупват дялящи се изотопи Pu-239 и Pu-241. Тъй като всеки от тези нуклиди има различен добив на ^{135}I и ^{135}Xe , общите добиви се определят в зависимост от моментния изотопен състав на горивото. Добивите на ^{135}Xe от тези изотопи, съгласно, [5], са както следва:

За Pu-239

- $\gamma_I^{239} = 6.54 \times 10^{-2}$
- $\gamma_{Xe}^{239} = 1.07 \times 10^{-2}$

За Pu-241

- $\gamma_I^{241} = 6.95 \times 10^{-2}$
- $\gamma_{Xe}^{241} = 2.27 \times 10^{-3}$

Общото макроскопично сечение за делене, отчитайки както изгарянето на U-235, така и натрупването на дялящите се нуклиди Pu-239 и Pu-241, се определя като:

$$\Sigma_f^{tot} = \sigma_f^{235} \cdot N^{235}(t) + \sigma_f^{239} \cdot N^{239}(t) + \sigma_f^{241} \cdot N^{241}(t)$$

$$\sigma_f^{239} = 747 \text{ barn}$$

$$\sigma_f^{241} = 1010 \text{ barn}$$

Определяне на параметрите и коефициентите (константите), необходими за пресмятанията

Константи съгласно [5]:

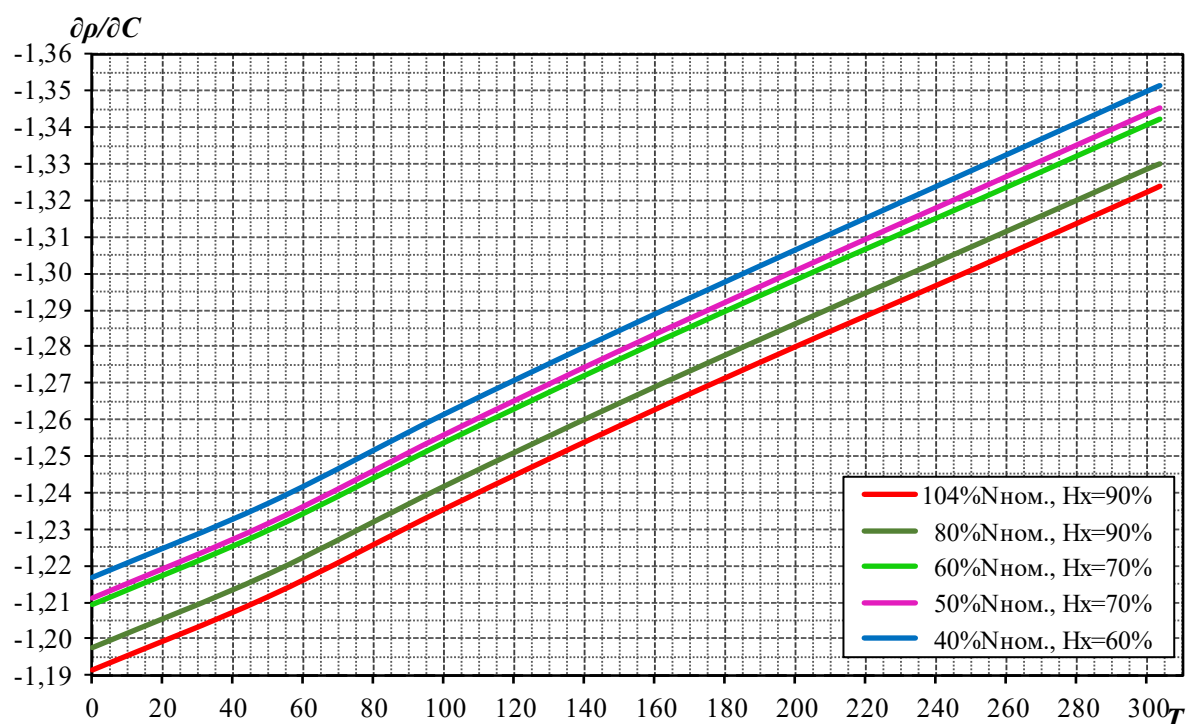
- $\gamma_I^{235} = 6.28 \times 10^{-2}$
- $\gamma_{Xe}^{235} = 2.5710^{-3}$
- $\gamma_I^{239} = 6.53 \times 10^{-2}$
- $\gamma_{Xe}^{239} = 1.07 \times 10^{-2}$
- $\gamma_I^{241} = 6.94 \times 10^{-2}$
- $\lambda^{Xe} = 0.07584 \text{ h}^{-1}$
- $\lambda^I = 0.10550 \text{ h}^{-1}$
- $\sigma_f^{239} = 747 \text{ barn}$
- $\sigma_f^{241} = 1010 \text{ barn}$
- $\sigma_a^{Xe} = 2.7 \times 10^6 \text{ barn}$

Така определените добиви на ^{135}Xe , ^{135}I , както и общото макроскопично сечение на делене, се използват в решението на системата уравнение (14).

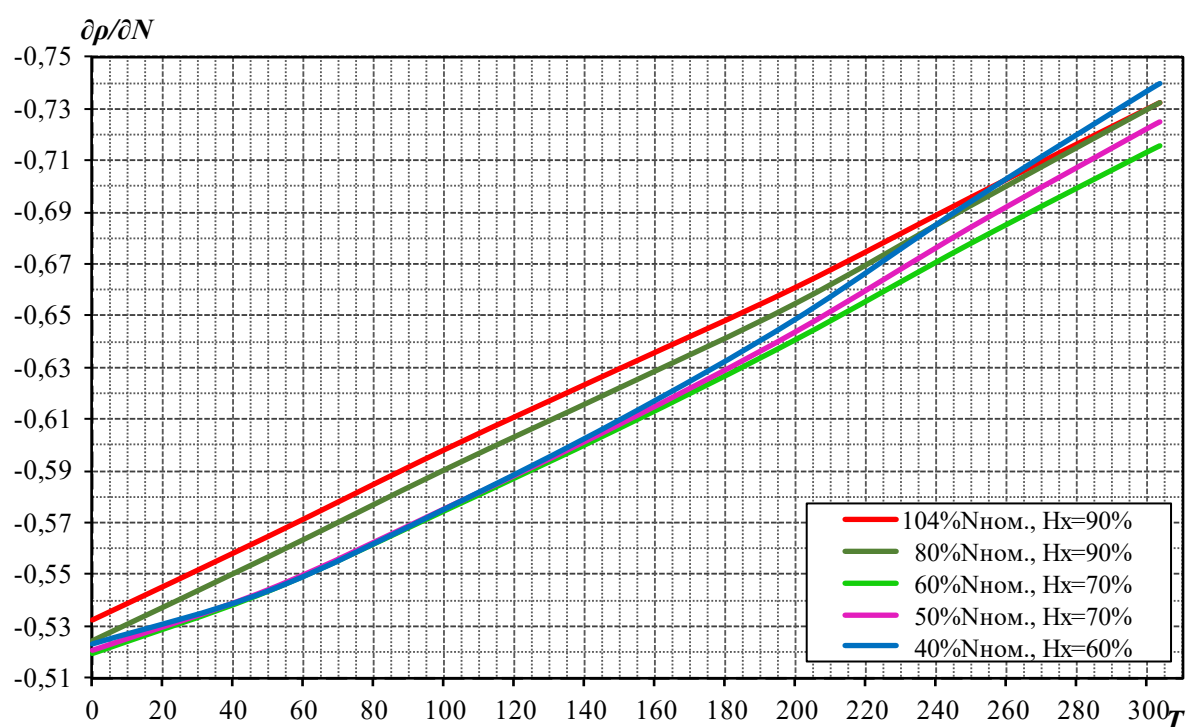
Определяне на критична борна концентрация при изменение на мощността:

В CriticalCalc за практически пресмятания, коефициентите на реактивност $\frac{\partial \rho}{\partial C_{H3BO3}}$, $\frac{\partial \rho}{\partial N}$, $\frac{\partial \rho}{\partial t_{h20}}$ се отчитат чрез линейна интерполация между две известни стойности изчислени от сектор РФР.

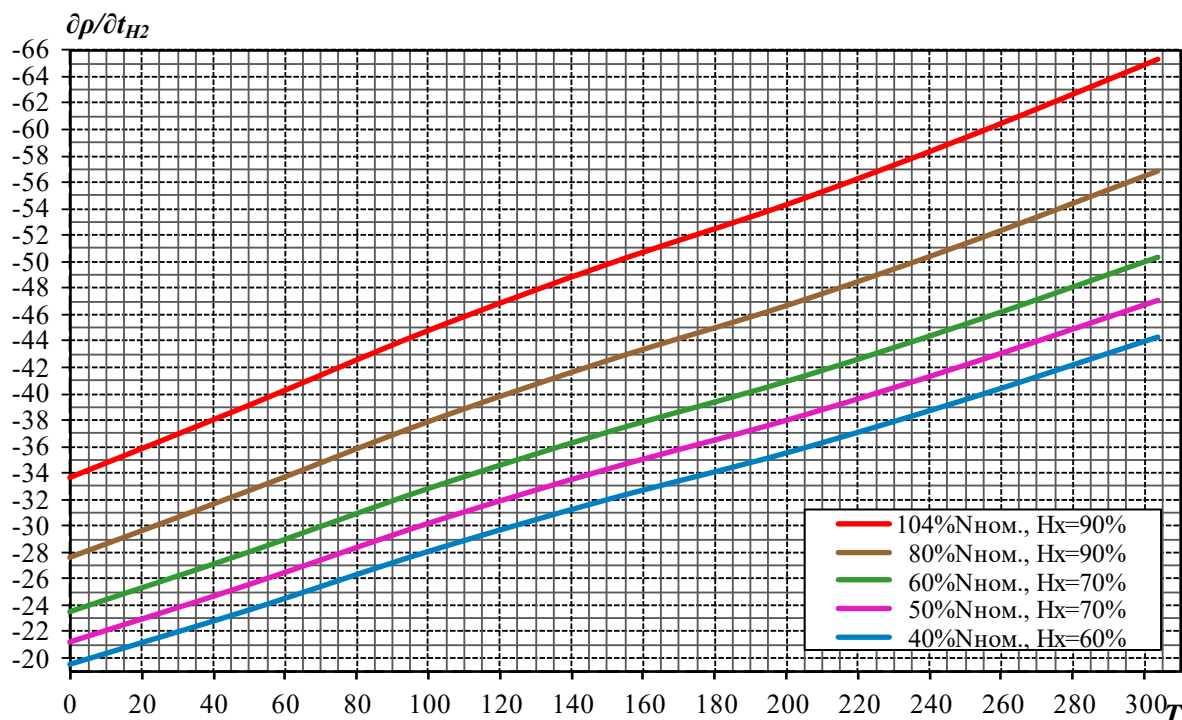
В сектор РФР са извършени пресмятания на неутроннофизични характеристики за примерна горивна кампания на реактор ВВЕР-1000. Неутроннофизичните характеристики за съответната кампания са пресметнати с модифицираната версия на програмния комплекс КАСКАД, включващ основно програмите БИПР-7А, ПЕРМАК-А, и ПРОРОК-А, с НФ константи, подготвени по програмата ТВС-М.



Графика 1. Стойности на коефициента на реактивност по концентрация на борна киселина в топлоносителю по време на примерната горивна кампания, използвана за извършените изчисления, при работа на 4 ГЦП, $H1=0$



Графика 2. Стойности на коефициента на реактивност по мощност по време на примерната горивна кампания, използвана за извършените изчисления, при работа на 4 ГЦП



Графика 3 Стойности на коефициентите на реактивност по мощност и по температура на топлоносителя по време на примерната горивна кампания, използвана за извършените изчисления, при работа на 4 ГЦП

Стойностите за ефективността на групи ОР СУЗ са определени чрез извършени пресмятания от сектор РФР, като въведената реактивност от изменение на положението на групи ОР СУЗ се определя при допускането за равномерно въвеждане на реактивност между две състояния.

Така единствената неизвестна в уравнението остава изменението на борната концентрация в реактора. След интерполиране на решенията на това уравнение за всеки „i“ минутен интервал от време се получава непрекъсната крива на критичната борна концентрация.

$$\Delta C_{H3BO3} = \frac{\Delta \rho_{i \text{ ОРСУЗ},i} + \Delta \rho_{N,i} + \Delta \rho_{T+} + \Delta \rho_{ХЕ,i}}{\frac{\partial \rho}{\partial C_{H3BO3}}} \quad (30)$$

Изменението на концентрацията на борна киселина се определя в зависимост от скоростта на изменение на мощността (което оказва влияние както върху скоростта на въвежданата реактивност от мощностен ефект, така и върху формата и стойността на реактивността, въведена от изменението на концентрацията на ксенон-135) и скоростта на въвеждане на реактивност от ОР СУЗ.

Знаейки изменението на борната киселина, текущата концентрация се определя като:

$$C_i = C_{i-1} + \Delta C_i$$

(31)

C_i – текуща концентрация на борна киселина в момента i (g/kg)

C_{i-1} – концентрация на борна киселина в момента $i-1$ предхождащ момента i (g/kg)

ΔC_i – изменение на борната концентрация за интервала време от $i-1$ до i (g/kg)

В HELNEX пресмятането на критична концентрация на бора се различава от пресмятането на зададено състояние по това че зададената концентрация на бора се разглежда като начална и се изменя, за да се получи критично състояние ($k_{eff}=1$). Целта е да се достигне зададена стойност на реактивността, която означаваме с ρ^* . Означени са с $C_B^{(1)}$ и $\rho^{(1)}$ зададената начална концентрация на бора и получената стойност на реактивността при пресмятането на зададеното състояние на активната зона с нея. Пресмята се нова концентрация на бора по формулата:

$$C_B^{(2)} = C_B^{(1)} + (\rho^* - \rho^{(1)}) / \partial \rho / \partial C_B \quad (32)$$

Като началната стойност на производната $\partial \rho / \partial C_B$ се задава като начална стойност на коефициента на реактивност по концентрацията на бора. Пресмята се второ състояние на активната зона и новата стойност на ρ се използва най-напред за оценка на нова стойност на производната $\partial \rho / \partial C_B$

$$\partial \rho / \partial C_B = (\rho^{(2)} - \rho^{(1)}) / (C_B^{(2)} - C_B^{(1)}) \quad (33)$$

Но само ако $|C_B^{(2)} - C_B^{(1)}| \geq 0.025$. Тази процедура се повтаря, докато се получи стойност на ρ , отговаряща на условието $|\rho - \rho^*| \leq \epsilon_6$. ϵ_6 е толерансът на сходимост по реактивност при търсене на критичност. Стандартната стойност е 0.002, [3]. В нашите сметки толерансът на сходимост по реактивност при търсене на критичност е 0.001.

След пресмятане на второто състояние се пресмята по-точна стойност $\partial \rho / \partial C_B$ и търсенето на критичност продължава по обичайна схема. Критичната концентрация на бора се пресмята по формула:

$$C_B^{(cr)} = C_B^{(n)} + (\rho^* - \rho^{(n)}) / \partial \rho / \partial C_B, \quad (34)$$

Където n е номерът на последното пресметнато състояние.

Въвеждане на данни, необходими за пресмятане на преходен процес на ^{135}Xe и определяне на критичната борна концентрация с CriticalCalc

Начално състояние и задание за изменение на мощността

Промяна на мощност по електрическа мощност: **Не**

Начално състояние:

Т _{eff} [°C]	200	Брой работещи ГЩ:	4	
С _{сервиз} (YC) [g/kg]	4.29	N _{max} X гр. [%]	90	
N _{нач} [% (MWth)]	104	3120	N _{max} IX гр. [%]	100
N _{оп. нач} [MWth] %	880		N _{max} I гр. [%]	100
С _{сервиз} TB10 [g/kg]	40	dN/dt [%/h]	-6000	
Начало на процеса [dd-mm-yy hh:mm]	21.4.23 22:30	Интервал на пресмятане [hh:mm:ss]	0:06:00	
F _{TB10} [m3/h]	8	Интервал на пресмятане на Nth (Nst) [hh:mm:ss]	0:15:00	
F _{max} [m3/h]	3			

Крайно състояние:

N _{оп.} [% (MWth)]	0	0
N _{оп. кр.} [MWth]		
N _{оп. X гр.} [%]	90	
N _{оп. IX гр.} [%]	100	
N _{оп. I гр.} [%]	100	

Допълнителни процеси:

Предварителна промяна на топлинна мощност: **Не**

Данни за предварителната промяна на топлинна мощност

N _{нач} [%]	97.3	N _{оп.} [%]	40
Време за първоначална промяна на мощността [h]		0.1	
Момент след края на първоначалната промяна за мощността за последваща промяна [h]		0.7	
N _{оп. X гр.} [%]		67.2	
N _{оп. IX гр.} [%]		100	
N _{оп. I гр.} [%]		100	

Времетрайката или промяна на dN/dt:

Задръжка при мощност [% Nth]	80	Задръжка при ел. мощност [MW]	626
Продължителност на времетрайката	3	dN/dt [%/h] след времетрайката	-5
N _{нач. X гр.} [%]	62	N _{оп. X гр.} [%]	62
N _{нач. IX гр.} [%]	100	N _{оп. IX гр.} [%]	100
N _{нач. I гр.} [%]	100	N _{оп. I гр.} [%]	100

Резултати за конкретен момент:

Момент от време след края на процеса за пресмятане на крайния резултат [h]	200
Момент от време след началото на процеса за пресмятане на крайния резултат [h]	0.76666
Критична борна концентрация за нискания момент:	4.293

C _{сервиз} (YC) [g/kg]	6.268	Промяна в нивото на TB10 [cm]	27.52
Необходими обем H ₂ O ₃ [m ³]	11.50	Въвеждане на H ₂ O ₃ до [dd-mm-yy hh:mm]	
Въвеждане на H ₂ O ₃ от [dd-mm-yy hh:mm]		Въвеждане на H ₂ O ₃ до [dd-mm-yy hh:mm]	
τ, дозирание на H ₂ O ₃ за bmin [s/bmin]			
Необходими обем XOB [m ³]	0.00	Въвеждане на XOB до [dd-mm-yy hh:mm]	
Въвеждане на XOB от [dd-mm-yy hh:mm]		Въвеждане на XOB до [dd-mm-yy hh:mm]	
Ω, необходимо количество XOB за bmin [cm ³ /bmin]			

Nth крайно [%] [MWth]	0.0	0
N _{оп. кр.} [MWth]	NA	
Сервиз (YC) [g/kg]	6.27	
N _{оп. X гр.} [%]	90	
N _{оп. IX гр.} [%]	100	
N _{оп. I гр.} [%]	100	
Обща продължителност на процеса [hh:mm:ss]	0:01:02	
Начало на процеса: [dd-mm-yy hh:mm]	21.04.23 22:30	
Край на процеса: [dd-mm-yy hh:mm]	21.04.23 22:31	

За целите на настоящата дипломна работа с програмата HEX3D са извършени тримерни нодални пресмятания на активната зона за състояния, които имитират ксенонови процеси вследствие на стъпаловидна (мигновена) промяна в мощността на реактора. Имитацията на даден процес започва с намиране на условнокритично състояние при зададени параметри на активната зона, като за всяка следваща стъпка, която имитира развитие на процеса във времето (след началната промяна на мощността), първо се обновяват концентрациите на изотопите на йод-135 и ксенон-135 при предположение за фиксирано разпределение на мощността и неутронния поток (за времето на избраната стъпка), след което се пресмята ново състояние на активната зона с вече обновените концентрации на разглежданите нуклиди.

Едно от предимствата на пресмятанията с HEX3D спрямо СС е явното отчитане на пространственото разпределение на всички величини, които са важни за разглеждания процес. От друга страна, предимството на пресмятанията с СС е способността за много по-бърза оценка на важни за експлоатацията на реактора параметри, като критична борна концентрация в топлоносителя, на основата на предварително оценени неутроннофизични характеристики (като коефициенти на реактивност и други).

Въвеждане на данни, необходими за пресмятане на преходен процес на ¹³⁵Xe с HEX3D

```

10 21 .\lib\WVER1000a_new_Petko_1.H2D
11 22 .\output\xenon_B6-104-0.HBo
12 23 .\output\xenon_B6-104-0.HB0
13 24 .\lib\HEX3DP1_Dy.LIB
14 25 .\output\xenon_B6-104-0.H25
15 999
16 &GEOM MIS=1, LTESTi=0, &END
17 EOFINP
18 *-----
19 UNIT 6 CYCLE 30 - Criticality ! Var # 1
20 *-----
21 &MNDT KINT=4, JXE=2, IUPR=1,
22 NMLIN=1,
23 POWER=-104.d0, TBX=286.5d0, CB=-6.00d0, HDST(10)=-90.d0,
24 KTN=1,
25 TN=0.d0, 0.d0, -0.d0, 280.0d0, 63900.d0,
26 IFTEO=1, IPRINT=20*0, EPS(6)=0.0001,
27 G=63900.d0, COEFFPR=0.0d0,
28
29 LPCH=2
30 iprint(5)=3
31 iprint(8)=3
32 DATEND='O.K.', &END
33 EOFINP
34 *-----
35 UNIT 6 CYCLE 30 - Xe process ! Var # 2
36 *-----
37 &MNDT KINT=4, JXE=3,
38 NMLIN=-2,
39 POWER=-104.d0, TBX=286.5d0,
40 JODXE=1,
41 KTN=1,
42 TN=96.d0, 1.d0, -0.d0, 280.0d0, 63900.d0,
43 DATEND='O.K.', &END
44 EOFINP

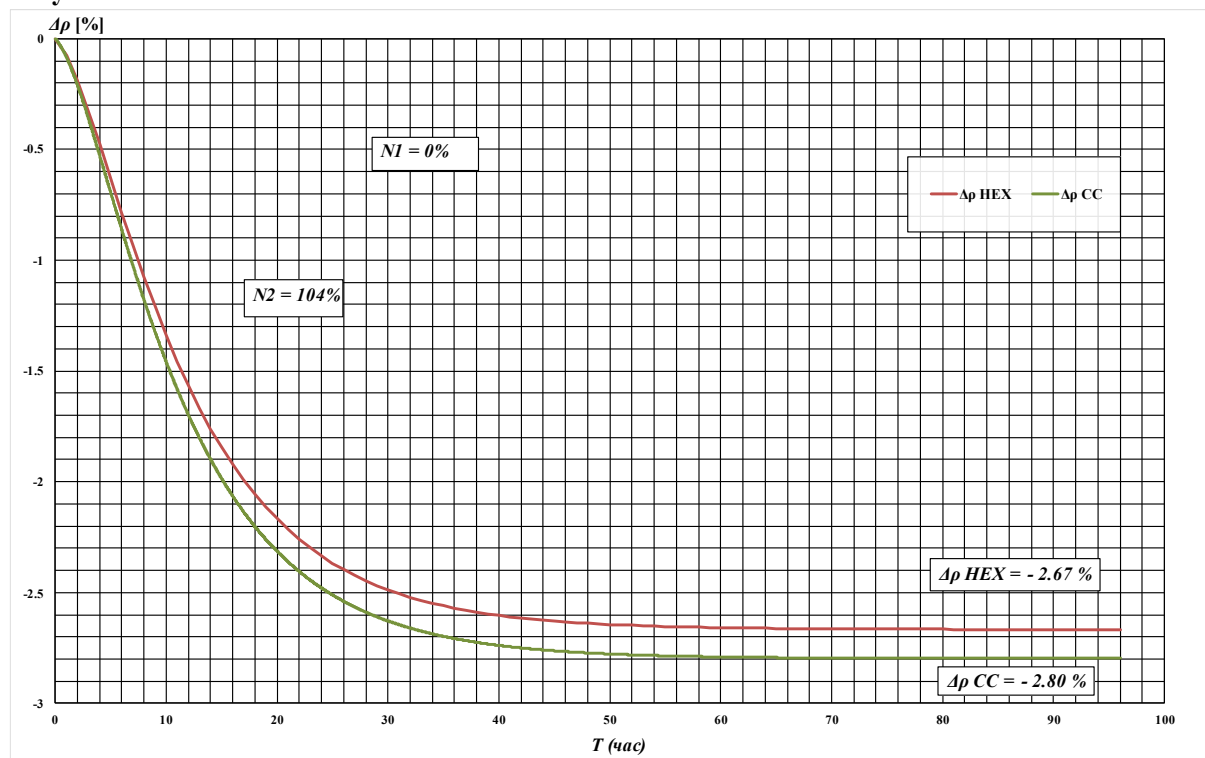
```

Пресмятането на преходен процес на ^{135}Xe започва с пресмятане на началните равновесни концентрации на ^{135}I и ^{135}Xe във всеки обем. Конкретният начин на пресмятане на началното състояние зависи от стойностите на параметрите JXE и IUPR.

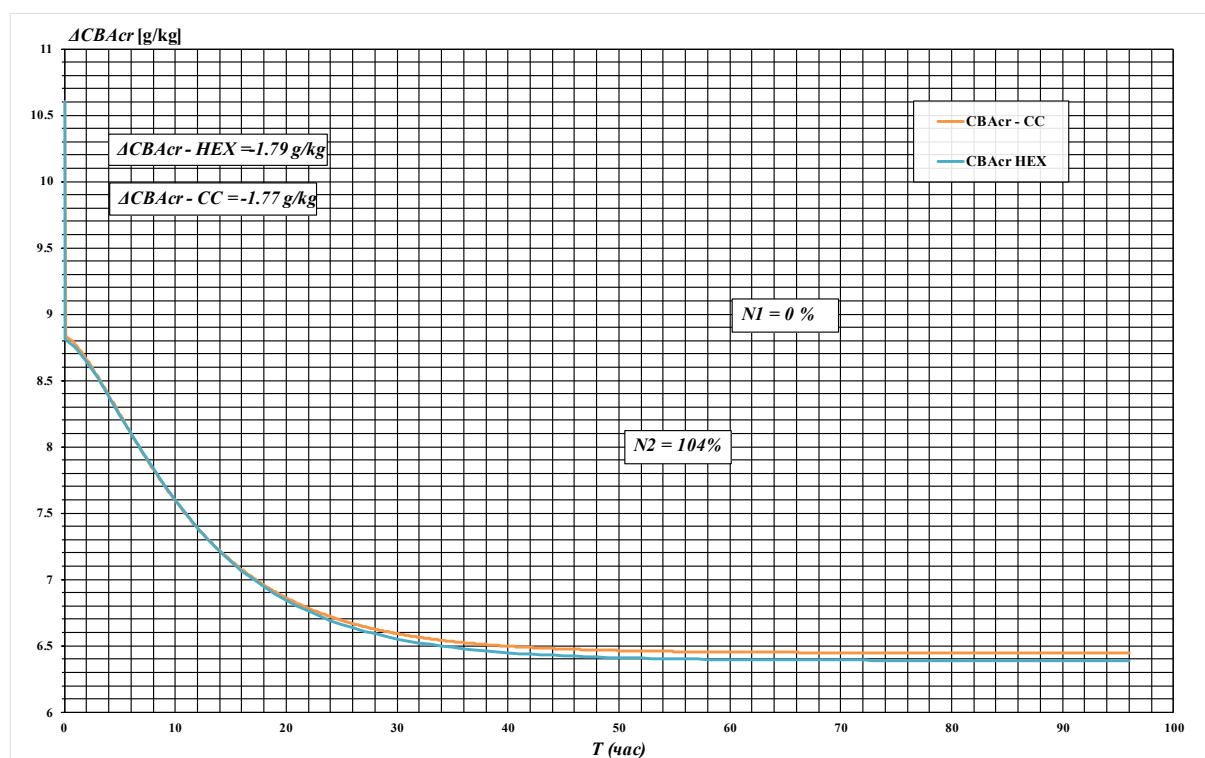
JXE=2, IUPR=1 - пресмята се състояние с критична концентрация на борната киселина

JXE=3 – пресмята се зададено състояние

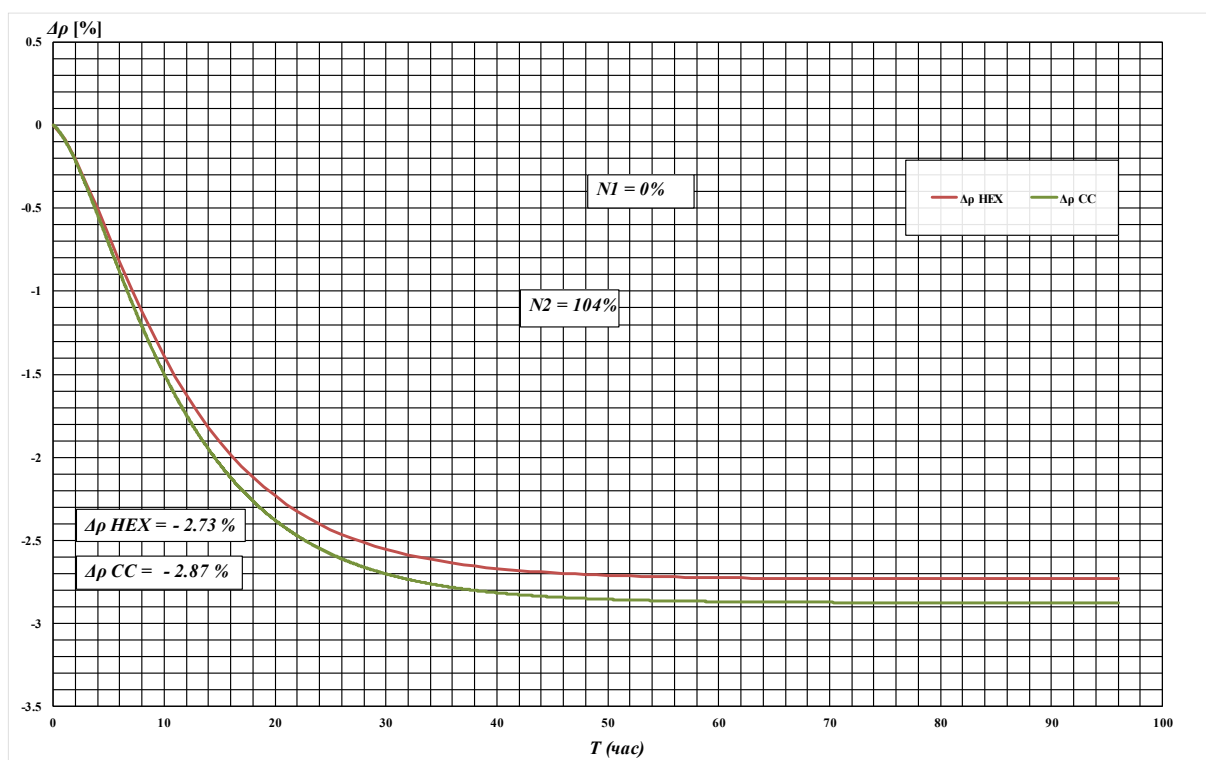
Резултат:



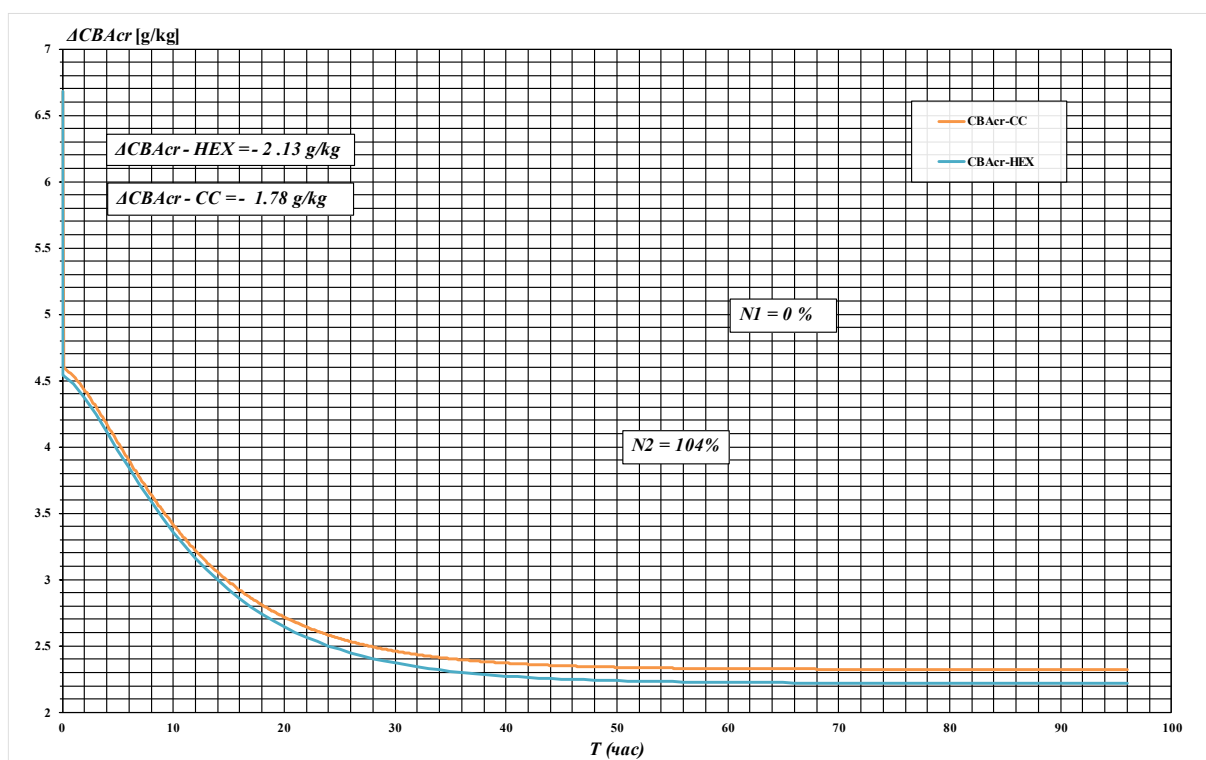
Фиг. 3 Изменение на реактивността на активната зона при преходни процеси на ^{135}Xe при изменение на мощността от $N1=0\%$ до $N2=104\%$ за началото на кампанията



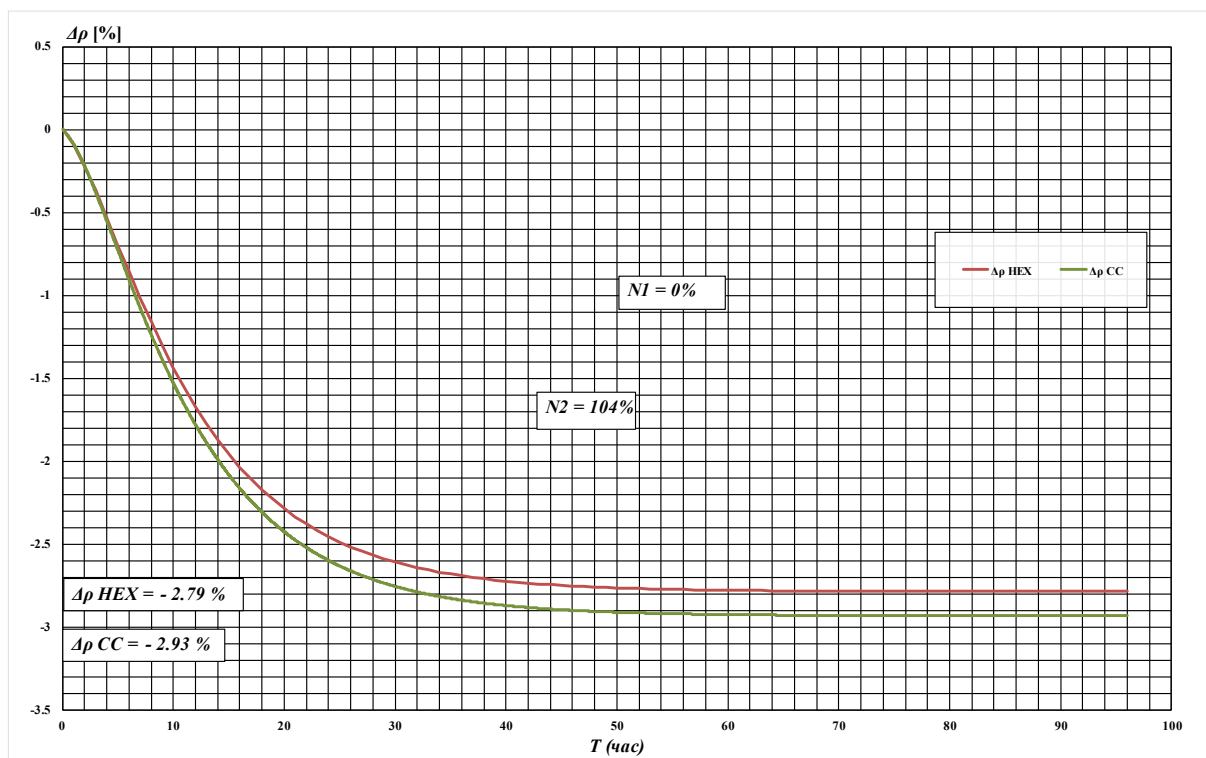
Фиг. 4 Изменение на критичната борна концентрация на активната зона при преходни процеси на ^{135}Xe при изменение на мощността от $N1=0\%$ до $N2=104\%$ за началото на кампанията



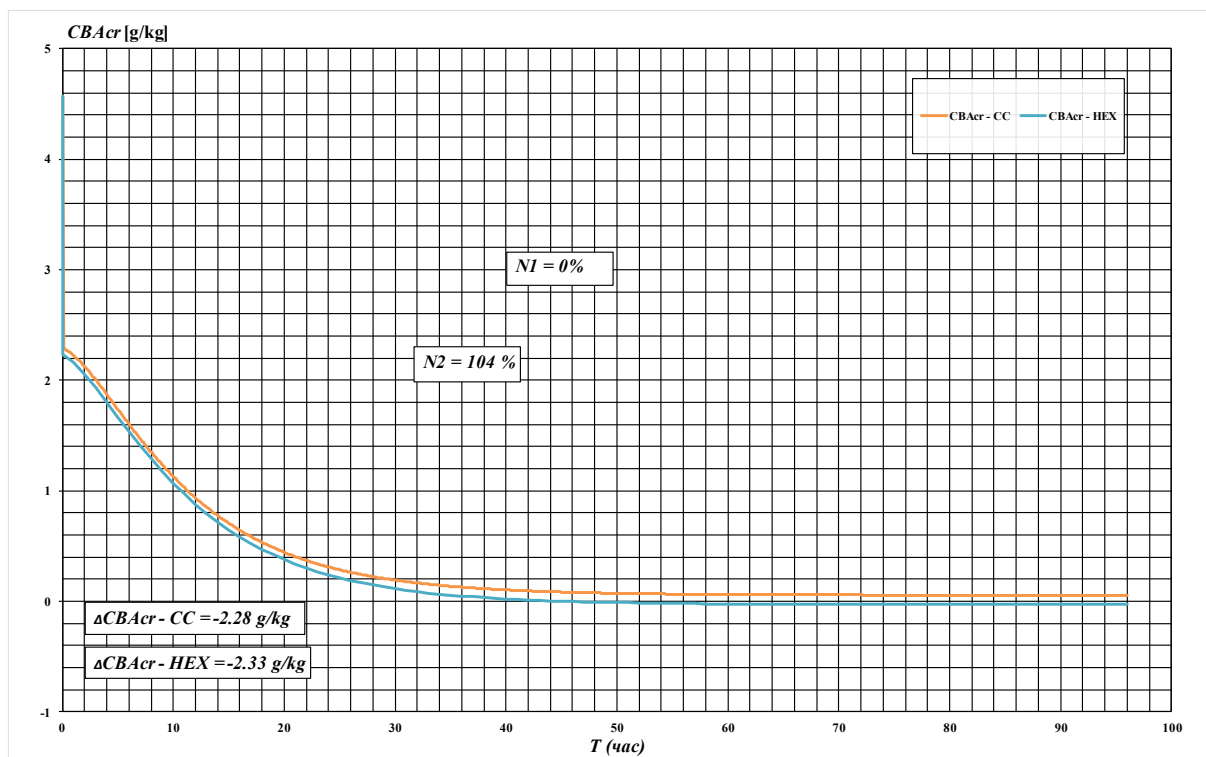
Фиг. 5 Изменение на реактивността на активната зона при преходни процеси на ^{135}Xe при изменение на мощността от $NI=0\%$ до $N2=104\%$ на 200 еф.ден. по време на кампанията.



Фиг. 6 Изменение на критичната борна концентрация на активната зона при преходни процеси на ^{135}Xe при изменение на мощността от $NI=0\%$ до $N2=104\%$ за 200 еф. деноноция



Фиг. 7 Изменение на реактивността на активната зона при преходни процеси на ^{135}Xe при изменение на мощността от $N1=0\%$ до $N2=104\%$ за края на кампанията



Фиг. 8 Изменение на критичната борна концентрация на активната зона при преходни процеси на ^{135}Xe при изменение на мощността от $N1=0\%$ до $N2=104\%$ за края на кампанията

Ефективни денонощия	HELHEX	CriticalCalc	Абсолютна разлика	
0 еф.д.	-2.67	-2.80	0.13%	$\Delta\rho \{ \%$
	-1.79	-1.77	0.02 g/kg	$\Delta CBAcr \{ g/kg \}$
200 еф.д.	-2.73	-2.87	0.14%	$\Delta\rho \{ \%$
	-2.13	-1.78	0.35 g/kg	$\Delta CBAcr \{ g/kg \}$
304 еф.д.	-2.79	-2.93	0.14 %	$\Delta\rho \{ \%$
	-2.33	-2.28	0.05 g/kg	$\Delta CBAcr \{ g/kg \}$

Равновесното ксеноново отравяне за примерната горивна кампания, при повишаване на мощността от 0% до 104% $N_{ном.}$, е съответно:

-за 0 ефективни HEX: - 2.67%, CC: -2.80%,

-за 200 еф. д. HEX: - 2.73 %, CC: -2.87%,

-за 304 еф. д. HEX: -2.79%, CC: -2.93%,

което отговаря и на минималното $\Delta\rho$.

Реактивностният ефект, предизвикан от ксеноновите преходни процеси, може да достигне значителни стойности и да превиши регулиращата способност на работната група, поради което се налага корекция на концентрацията на борна киселина в първи кръг, [1].

Борната крива следва кривата на $\Delta\rho$.

При преход от 0% до 104% $N_{ном}$ мощност $\Delta CBAcr$ е:

-за 0 ефективни HEX: -1.79 g/kg, CC: -1.77 g/kg,

-за 200 еф. д. HEX: - 2.13 g/kg, CC: -1.78 g/kg,

-за 304 еф. д. HEX: -2.33 g/kg, CC: -2.28 g/kg.

Разгледани са три процеса на повишаване на мощността от 0-104% $N_{ном}$, съответстващи на различни моменти от горивната кампания – в началото на кампанията, за 200 еф ден. и края на кампанията, след дълъг престой. И в трите случая се приема пускане на реактора след продължителен престой, поради което началните концентрации на ^{135}Xe и неговият предшественик ^{135}I могат да се считат практически за нулеви, поради пълен разпад (β^-) на двата изотопа.

При повишаване на мощността от 0 до пълна мощност се реализира първоначално намаляване на коефициента на размножение (отрицателен ефект върху реактивността) от плътностни и температурни ефекти от повишаване на температурата на топлоносителя и горивото и постоянно (номинално) налягане в първи контур. Тези ефекти се отчитат в CriticalCalc и HEX3DA, при отчитане на реактивностния ефект от ксеноновия преходен процес. Ефектите не се отчитат пряко и изменението на реактивността при двата подхода на пресмятане започва от 0 (отчитайки единствено ефекта от ксенона).

Ефектите се отчитат при прогнозната промяна на борната концентрация по време на процесите в свързаните графики, където промяната започва от началните концентрации определени от едната или другата програма.

При разглежданите процеси с повишаване на мощността от нулева, при напълно разотровен реактор в начално състояние, не наблюдаваме ксеноново колебание, а единствено процес на постепенно отравяне на реактора с времето до установяване на равновесна концентрация на ксенона (отравяне) характерна за мощност 104%Nном. Постепенно с реализираната мощност се натрупва ^{135}I като един от продуктите на делене в реакторната среда и с $T_{1/2} = 6.57$ часа чрез β^- -разпад расте концентрацията на отровителя ^{135}Xe . От приложените графики за трите момента от горивната кампания можем да определим, че равновесното отравяне е достигнато около 70-тия час след началото на процеса при отделните случаи. Въпреки че по-високият поток в края на кампанията намалява това време, трудно е да установим този ефект от приложените графики (зависимостта на времето на достигане на равновесна концентрация е чрез микросечението за залавяне на неутрон от ^{135}Xe , потока топлинни неутрони и вероятността за разпад на ксенона λ , произтича от (21). Ефектът или дълбочината на това отравяне отчитаме чрез въведената отрицателна реактивност от повишената концентрация на ксенон и също чрез необходимата промяна на борната концентрация за компенсирането ѝ.

В началото и през кампанията ядрата на отровителя ^{135}Xe се конкурират (в различна степен) за едни и същи топлинни неутрони с въведените поглътителите в активната зона за компенсиране на запасната реактивност на активната зона, тези поглътителите са разтворената в топлоносителя H_3BO_3 , въведената в определена степен регулираща 10-та група ОР СУЗ (в двата случая чрез изотопа $^{10}\text{B} - \sigma^a = 4000\text{b}$) и интегрирания в свежото гориво изгарящ поглъtitел гадолиниев оксид Gd_2O_3 . Тази конкуренция определя така наречената интерференция между поглътителите. В края на кампанията борната киселина е почти напълно изведена от топлоносителя на първи контур, изгарящият поглъtitел е изгорял след средата на кампанията, интерференцията между поглътителите е намаляла в значителна степен, в зоната остава единствено частично въведената 10-та група ОР СУЗ.

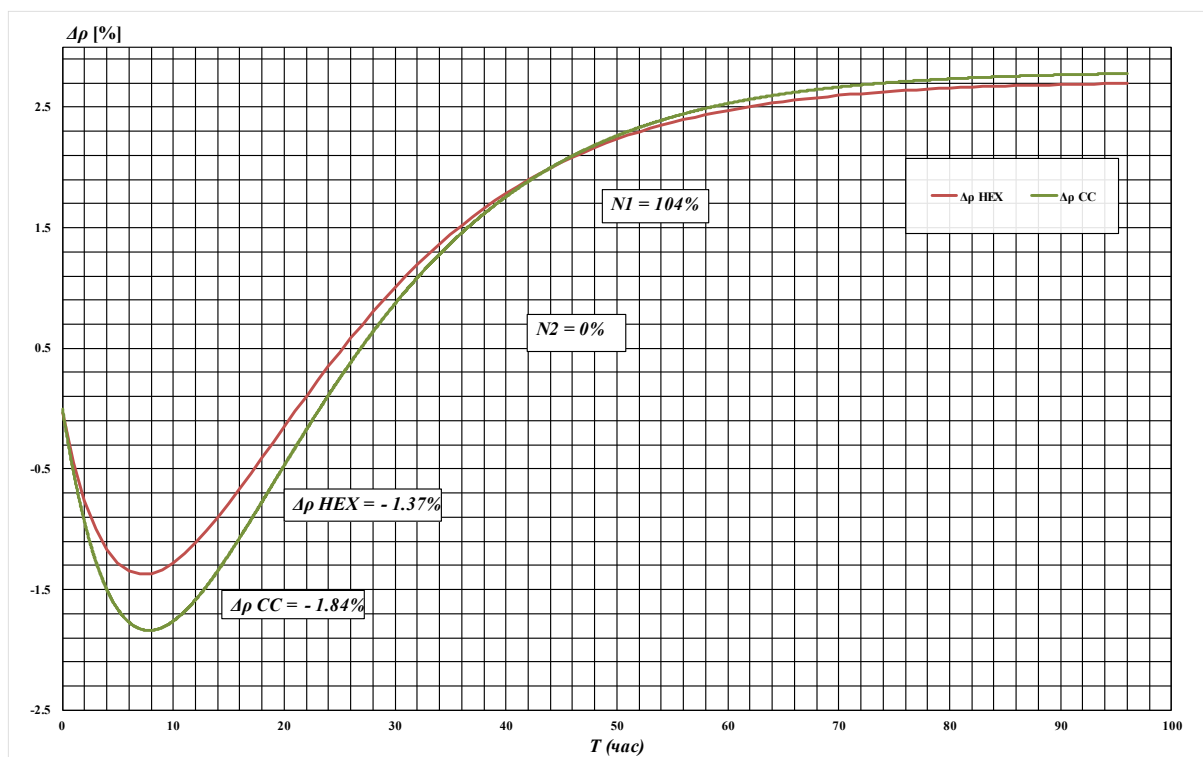
Тъй като концентрацията на ^{135}Xe е пропорционална на мощността на реакторната установка, в случая 104%Nном, очакваме сходна концентрация на ксенона в активната зона през трите разгледани момента от кампанията. Интерференцията между поглътителите обаче следва да доведе до по-малък ефект в реактивността в началото на кампанията, който ефект да нараства през кампанията, при предположение за сходна концентрация на ксенона, поради намаляване на интерференцията с останалите (конкуриращи) поглъtitелите в зоната. Именно такъв ефект наблюдаваме през кампанията – по-ниска по абсолютна стойност въвеждана отрицателна реактивност от отровителя в началото на кампанията, по-висока – при 200 еф.ден и най-висока стойност на отрицателната реактивност въвеждана от отравянето с ксенон в края на кампанията.

Респективно налаганата промяна в борната концентрация през кампанията за компенсиране на ефекта от отравяне заема най-малка абсолютна стойност в началото на кампанията и се променя към повишаване на абсолютната стойност на промяната.

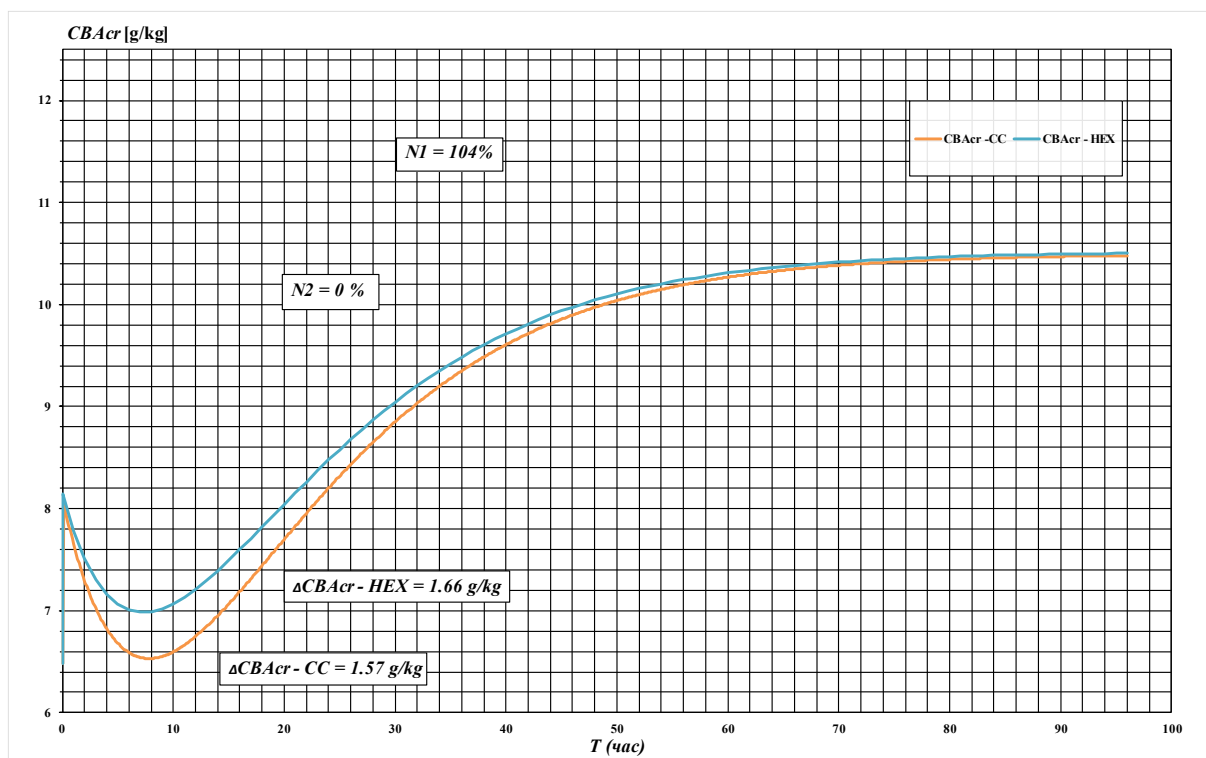
Равновесната концентрация на ^{135}Xe следва да е относително постоянна през кампанията, защото реакторът работи на стационарна (еднаква) мощност, при която скоростта на реакциите на делене се запазва, очаква се да се запазва и добивът на ^{135}I като продукт на деленето, съответно да се запазва и кумулативният добив на ^{135}Xe . Това твърдение не е съвсем вярно, защото към края на кампанията нараства относителният брой реакции на индуцирано делене с топлинни неутрони на натрупания ^{239}Pu (възпроизводство). При делене на ядрата на ^{239}Pu е по-висок прекият добив на ^{135}Xe , по-висок е и прекият добив на ^{135}I , т.е. по-висок е кумулативният добив на ^{135}Xe при делене на ядрата на ^{239}Pu , сравнено с индуцираното делене на ядрата на ^{235}U . Същото може да се каже и за деленето чрез прагова реакция на ^{238}U – по-висок е кумулативният добив на ^{135}Xe , а през кампанията с нарастване на неутронния поток расте и относителният брой на деленията на ^{238}U . Описаните ефекти водят до повишаване на концентрацията на ксенон в хода на кампанията, като ефектът както и по-горе е към увеличаване по абсолютна стойност на въвежданата отрицателна реактивност от отравяне. Описаният ефект отново кореспондира с получаваните

стойности на реактивностния ефект от отравянето при двата разглеждани метода за оценка (пресмятане) в случая на повишаване на мощност от 0 до 104% Nном през горивната кампания.

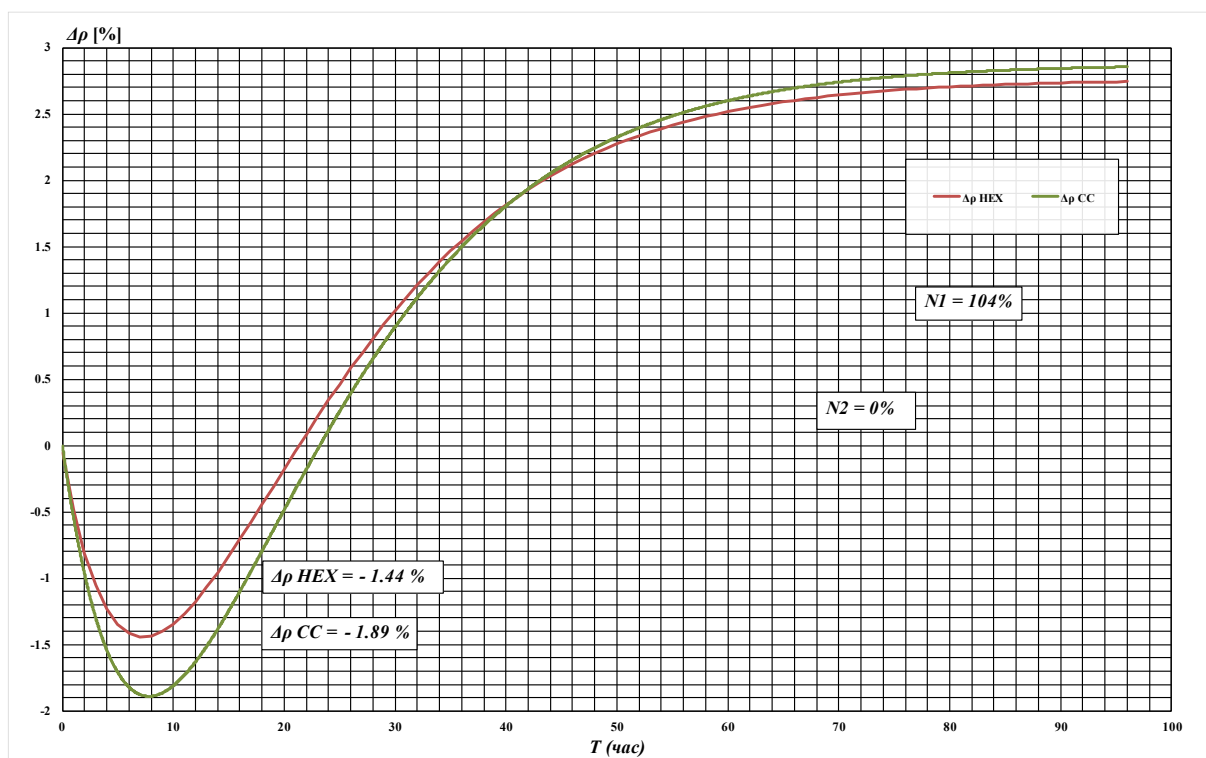
Аналогична тенденция се наблюдава и при изменението на критичната концентрация на борна киселина $\Delta CBAcr$. В началото на кампанията, когато интерференцията между ^{135}Xe и останалите поглъщатели е по-силно изразена, необходимата промяна на борната концентрация за компенсиране на ксеноновото отравяне е по-малка. С напредването на кампанията и намаляването на влиянието на разтворения бор и изгарящите поглъщатели реактивностният ефект на ксенона нараства по абсолютна стойност, което води и до по-голяма необходима корекция на критичната борна концентрация.



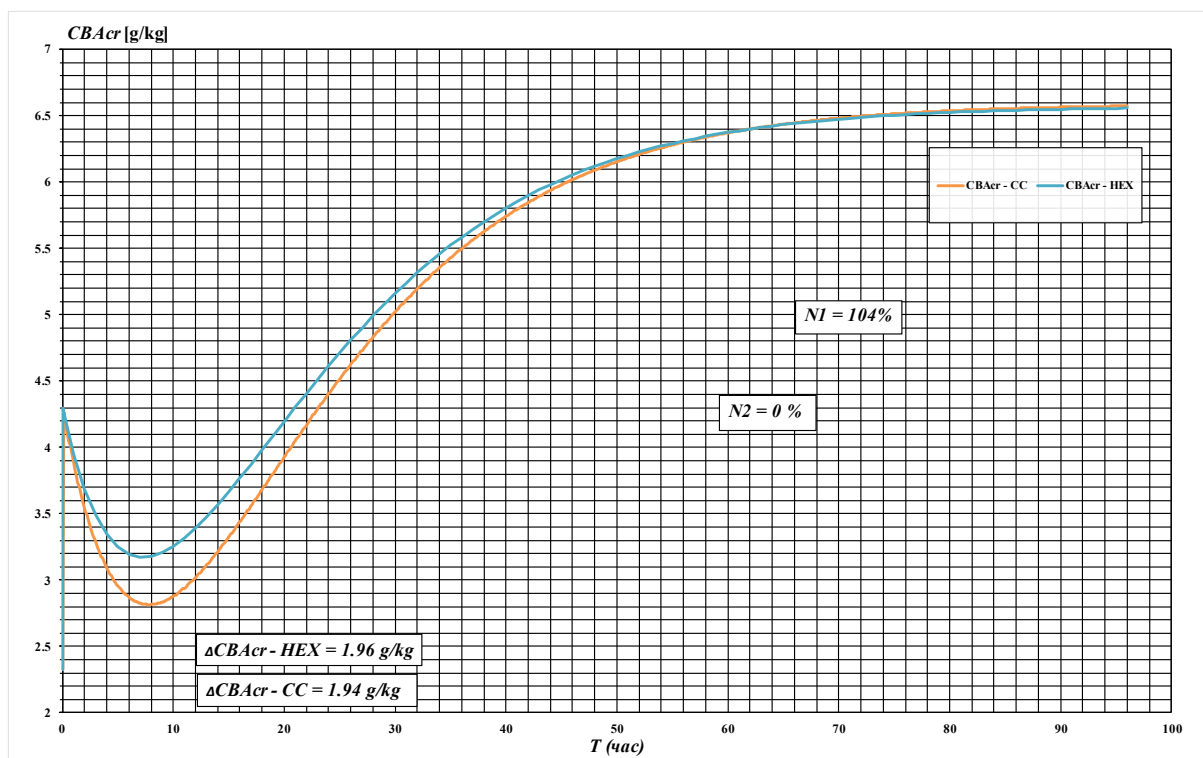
Фиг. 9 Изменение на реактивността на активната зона при преходни процеси на ^{135}Xe при изменение на мощността от $N1=104\%$ до $N2=0\%$ за началото на кампанията.



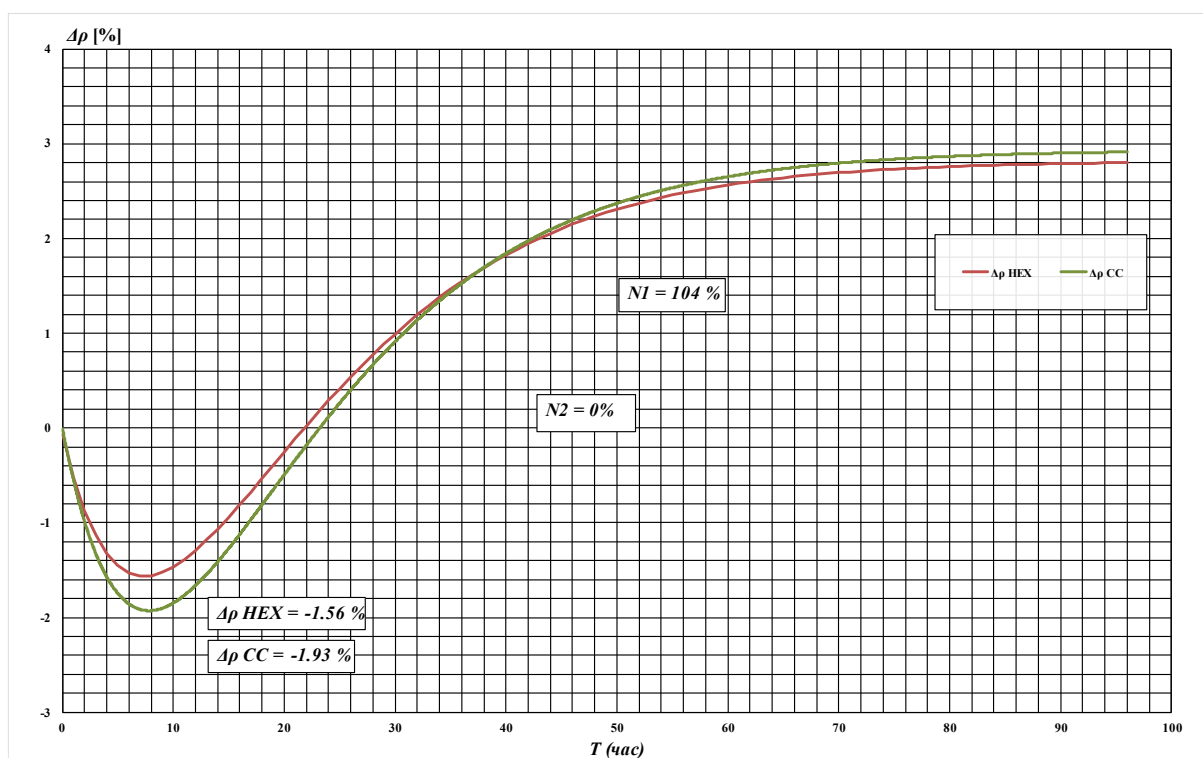
Фиг. 10 Изменение на критичната борна концентрация на активната зона при преходни процеси на ^{135}Xe при изменение на мощността от $NI=104\%$ до $N2=0\%$ за началото на кампанията



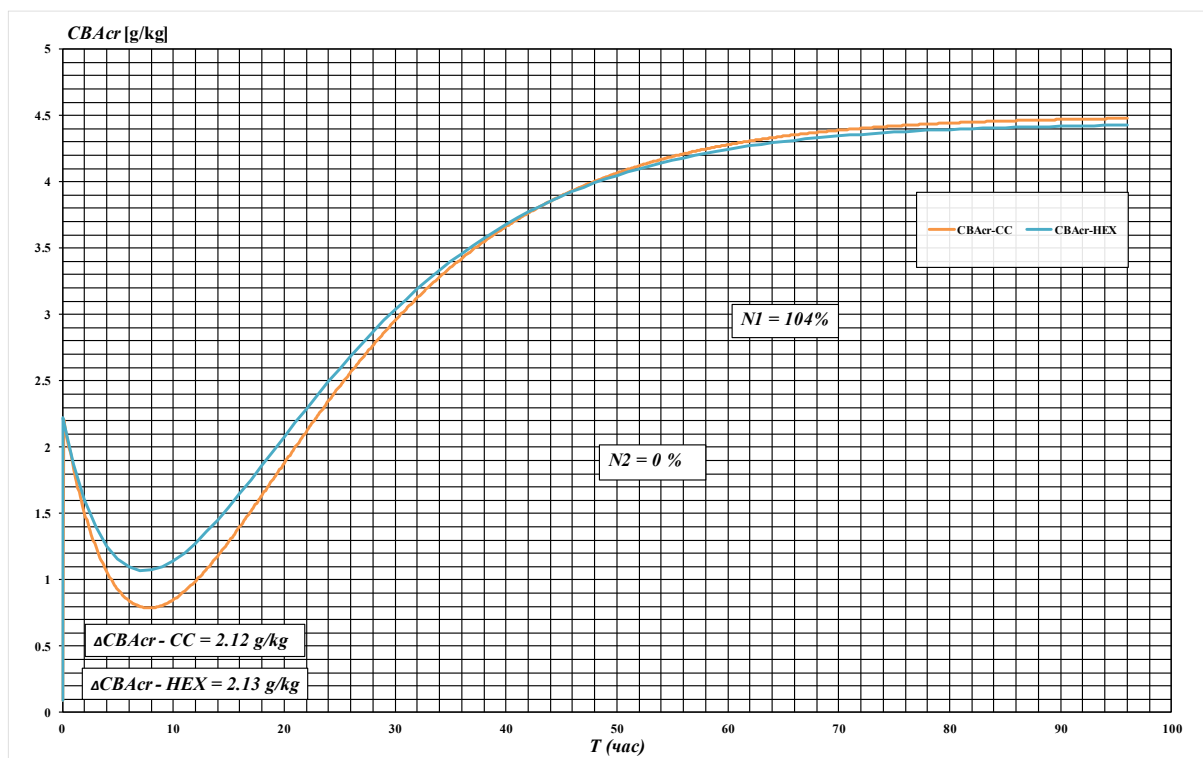
Фиг. 11 Изменение на реактивността на активната зона при преходни процеси на ^{135}Xe при изменение на мощността от $NI=104\%$ до $N2=0\%$ на 200 еф.ден. по време на кампанията



Фиг. 12 Изменение на критичната борна концентрация на активната зона при преходни процеси на ^{135}Xe при изменение на мощността от $N1=104\%$ до $N2=0\%$ за 200 еф. денонощия



Фиг. 13 Изменение на реактивността на активната зона при преходни процеси на ^{135}Xe при изменение на мощността от $N1=104\%$ до $N2=0\%$ за края на кампанията.



Фиг. 14 Изменение на критичната борна концентрация на активната зона при преходни процеси на ^{135}Xe при изменение на мощността от $N1=104\%$ до $N2=0\%$ за края на кампанията

Ефективни денонощия	HELHEX	CriticalCalc	Абсолютна разлика	
0 еф.д.	-1.37	-1.84	0.47 %	$\Delta\rho \{ \%$
	1.66	1.57	0,09 g/kg	$\Delta\text{CB}_{\text{Acr}}\{ \text{g/kg} \}$
200 еф.д	-1.44	-1.89	0.45 %	$\Delta\rho \{ \%$
	1.96	1.94	0.02 g/kg	$\Delta\text{CB}_{\text{Acr}}\{ \text{g/kg} \}$
304 еф.д	-1.56	-1.93	0.37 %	$\Delta\rho \{ \%$
	2.12	2.13	0.01 g/kg	$\Delta\text{CB}_{\text{Acr}}\{ \text{g/kg} \}$

За примерната горивна кампания, при преход от равновесно състояние на номинална мощност към нулева мощност, дълбочината на йодната яма достига:

-за 0 еф. ден. е HEX: -1.37% и CC: -1.84%,

-за 200 еф. ден. е HEX: -1.44% и CC: -1.89%.

- за края на кампанията: HEX: -1.56 % и CC: - 1.93%

$\Delta\text{CB}_{\text{Acr}}$ от номинална мощност до 0% е:

-за 0 ефективни HEX: 1.66 g/kg, CC: 1.57 g/kg,

-за 200 еф. д. HEX: 1.96 g/kg, CC: 1.94 g/kg,

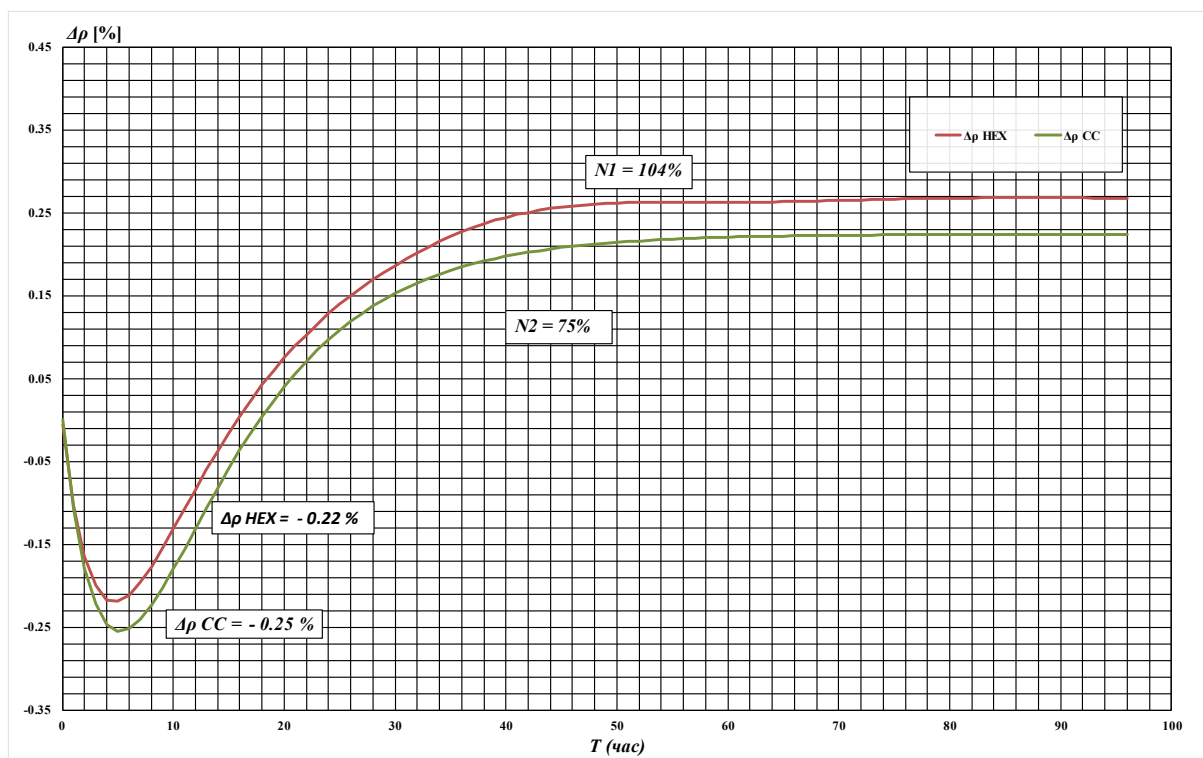
-за 304 еф. д. HEX: 2.12 g/kg, CC: 2.13 g/kg,

Нарастването на ΔCBA_{Cr} в съответствие с увеличаването по абсолютна стойност на реактивностния ефект, свързан с ксеноновото отравяне и последващото разотравяне на реактора. По-големият ефект на ^{135}Xe изисква и по-голяма промяна на борната концентрация за компенсиране на изменението на реактивността.

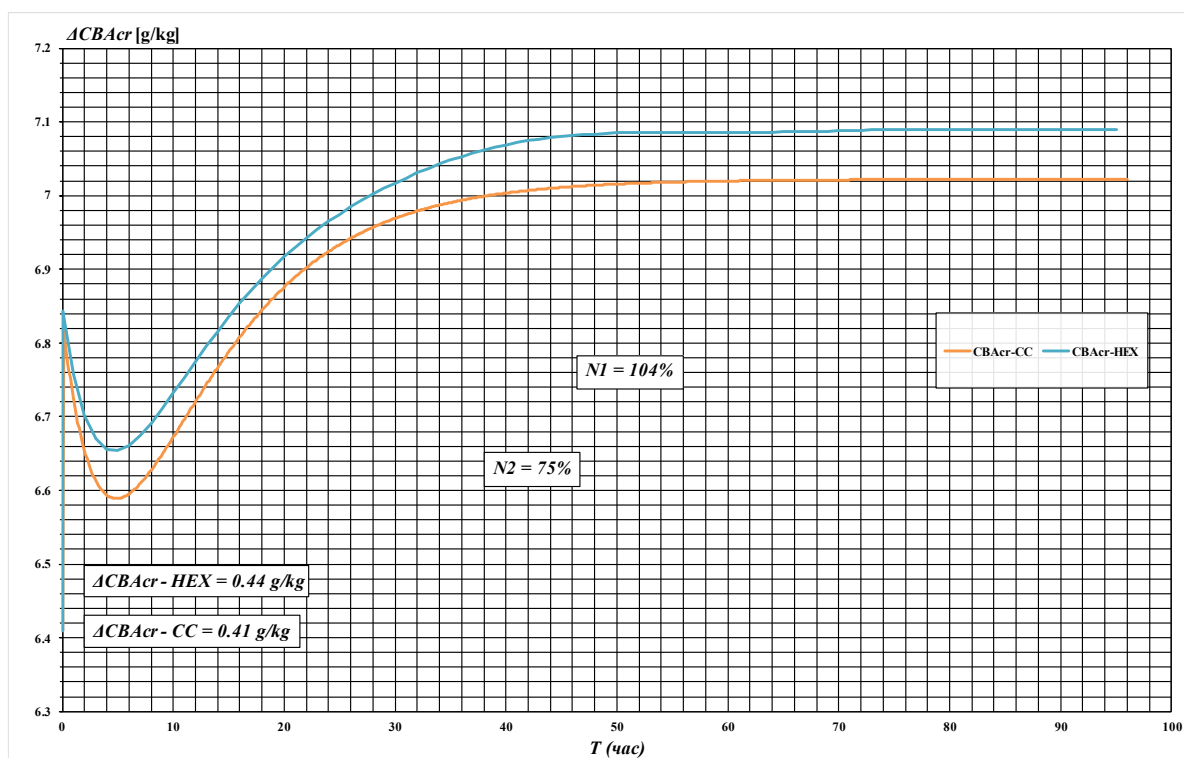
Разгледаните три процеса на понижаване на мощността от 104%Nном. до 0 обхващат отново начало, 200 еф.ден. и край на кампанията и разглеждат спиране на реактора след стационарна работа при достигнати равновесни концентрации на ^{135}Xe и неговия предшественик ^{135}I . При понижаване на мощността от пълна до нулева мощност започва ксенонов преходен процес, проявяващ се с образуване на йодна яма. Намалването на неутронния поток до 0, при нулева мощност, изключва единия канал на намаляване на концентрацията на ядрата на ^{135}Xe – залавяне на неутрони. Относно намаляването на ядрата на ксенона остава единствено каналът на естествен разпад с $T_{1/2} = 9.14 \text{ h}$. Натрупаният предшественик ^{135}I (с период на полуразпад $T_{1/2} = 6.57 \text{ h}$), с равновесна концентрация превишаваща тази на ксенона, води до генериране на нови ядра на ксенона. Горните обстоятелства водят до първоначално увеличаване на концентрацията на ^{135}Xe до максимална стойност, когато скоростите на генерация (от ^{135}I) и разпад на ксенон се изравнят (при характерните концентрации на дъщерния ^{135}Xe и матерния изотоп ^{135}I), последващо намаляване на концентрация на ксенон с преминаване през равновесната за мощността в началото на процеса, до пълен разпад на йод и ксенон и отсъствието им в активната зона (реакторът е разотровен).

Първоначалното нарастване на ксеноновото отравяне при намаляване на мощността на реактора, в случая до 0 – спиране на реактора, се нарича „Йодна яма“, защото концентрацията на ксенон расте до стойност пропорционална на натрупания йод в активната зона. Нейната максимална дълбочина зависи от мощността преди спиране на реактора ($\sim$ концентрация на йода) и по-точно от концентрацията на йода в активната зона преди спирането на реактора (или в общия случай намаляването на мощността). Разглеждани са спирания на реактора в три момента от горивната кампания от една и съща – пълна мощност. Както бе споменато при предходно разгледаните процеси обаче (0 % - 104 %) концентрациите както на ^{135}Xe , така и на ^{135}I в хода на кампанията нарастват, което определя по-дълбока йодна яма в края на кампанията. Именно този ефект наблюдаваме при извършените пресмятания, при които с напредването на горивната кампания отрицателните стойности на реактивността нарастват по абсолютна стойност, т.е. нараства дълбочината на йодната яма. Дълбочината на йодна яма за 0 еф. д. е HEX: -1.37% и CC: -1.84%, за 200 еф. д. е HEX: -1.44% и CC: -1.89%, HEX -1.56% и CC: -1.93% за края на кампанията

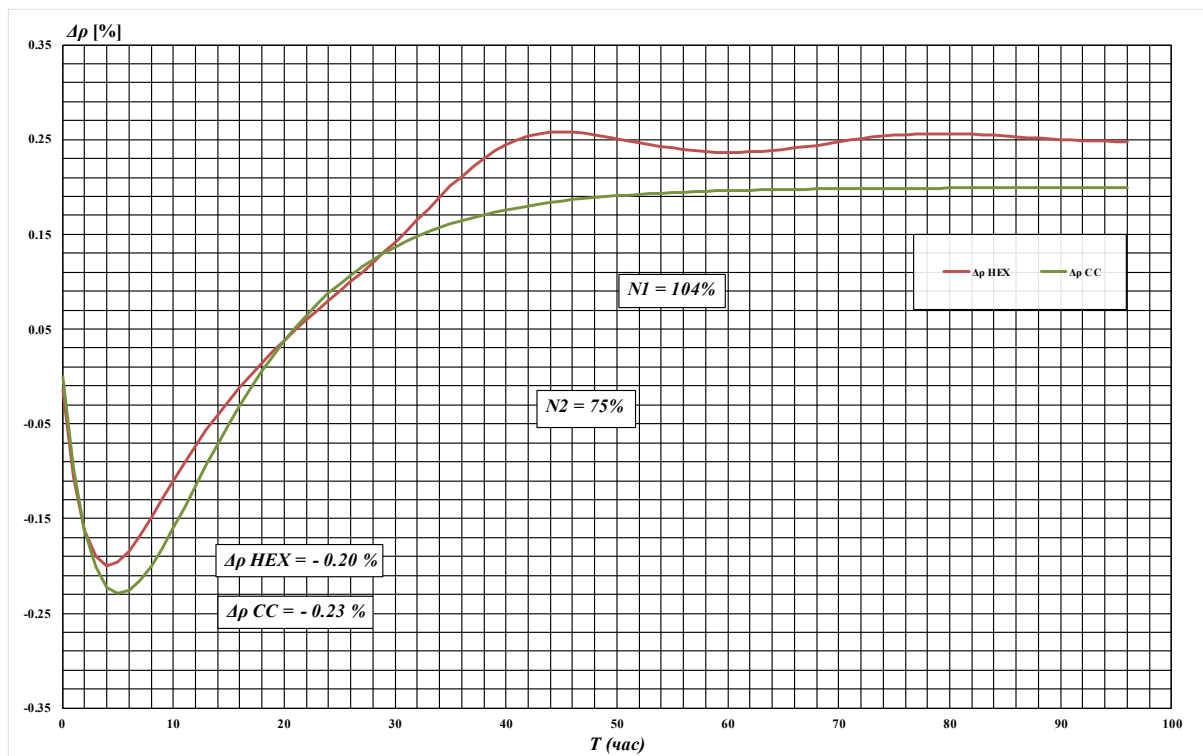
От графиките се вижда, че максималното отравяне на реактора се реализира около 8-мия час след началото на процеса и нейната дълбочина расте в хода на кампанията. Новата равновесна концентрация на ксенон се установява след около 3 денонощия (в случая нулева концентрация, реакторът е разотровен), от приложените графики лесно може да се проследи, че в края на разгледаните ксенонови процеси се отключва положителна реактивност равна като абсолютна стойност на отрицателната реактивност въвеждана при отравянето на реактора при предходно разгледаните процеси разглеждащи прехода от нулева мощност към 104%Nном. Ясно е защо това е така, в предходния случай установяваме ефекта от равновесното отравяне от ^{135}Xe при пълна мощност, а при настоящия – ефекта на разотравяне вследствие от намаляване на равновесна концентрация за пълна мощност до нулева при спиране на реактора.



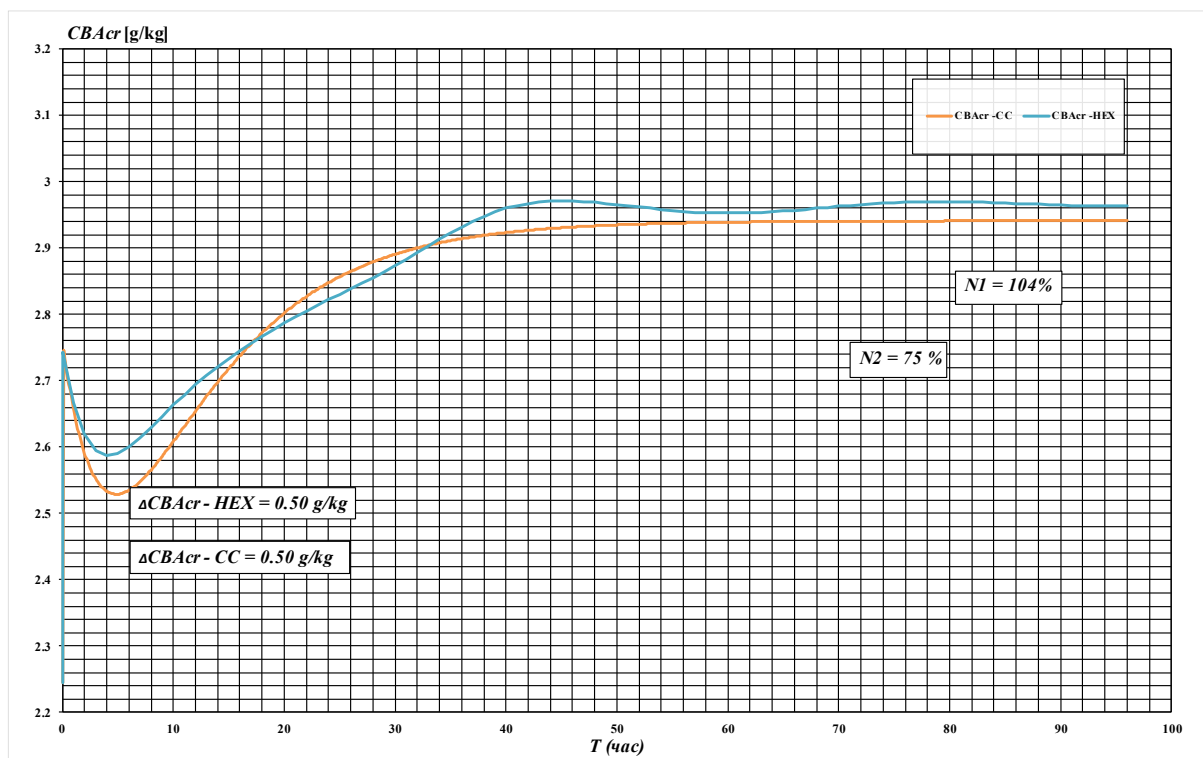
Фиг. 15 Изменение на реактивността на активната зона при преходни процеси на ^{135}Xe при изменение на мощността от $N1=104\%$ до $N2=75\%$ за началото на кампанията.



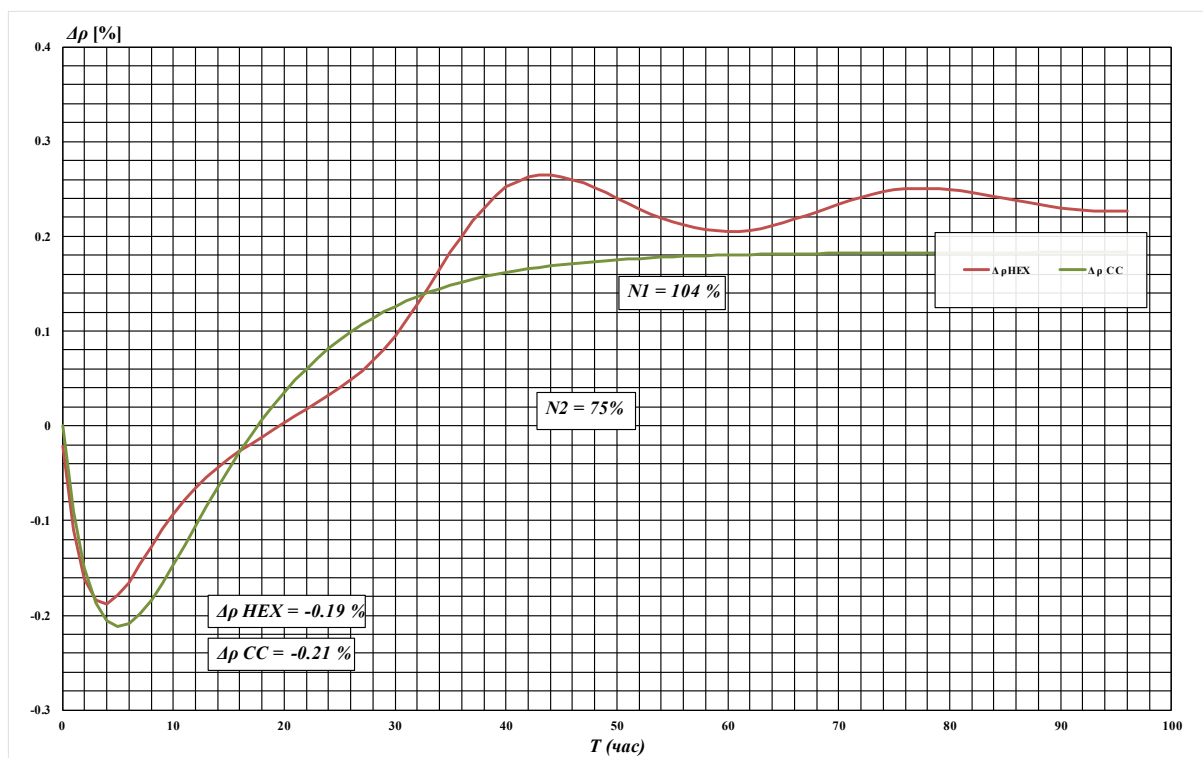
Фиг. 16 Изменение на критичната борна концентрация на активната зона при преходни процеси на ^{135}Xe при изменение на мощността от $N1=104\%$ до $N2=75\%$ за началото на кампанията.



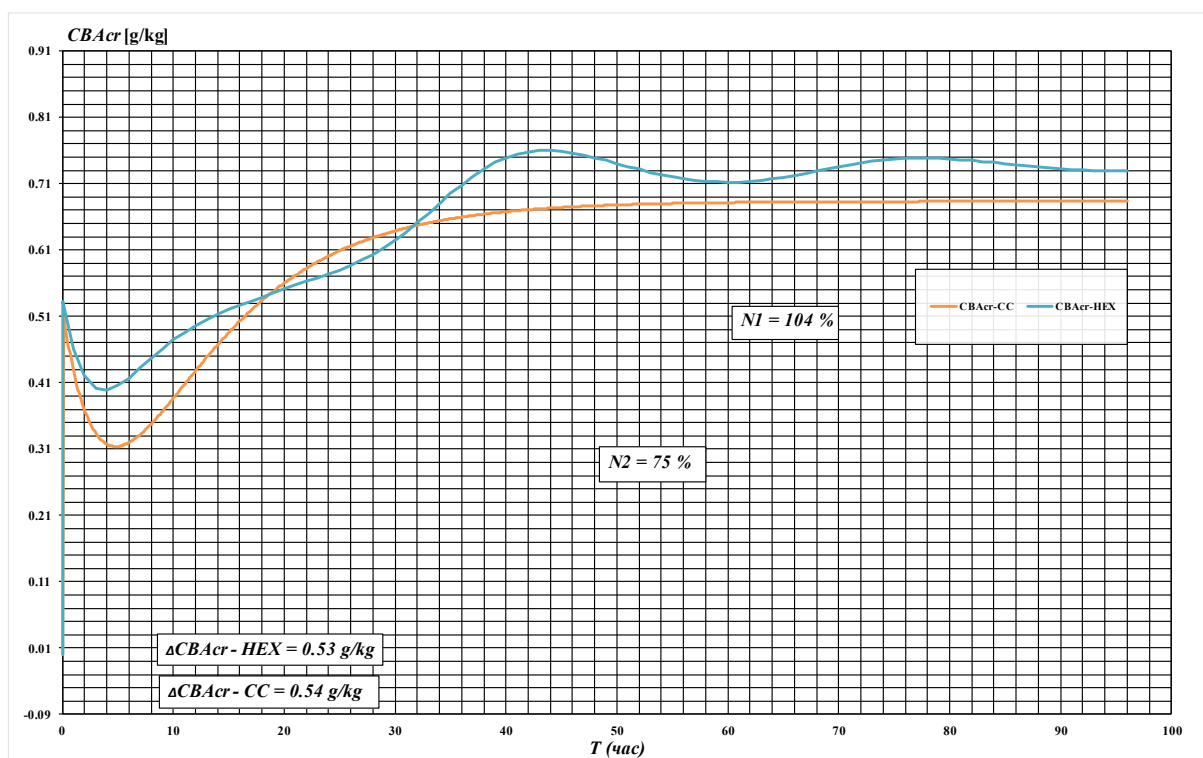
Фиг. 17 Изменение на реактивността на активната зона при преходни процеси на ^{135}Xe при изменение на мощността от $N1=104\%$ до $N2=75\%$ на 200 еф.ден. по време на кампанията.



Фиг. 18 Изменение на критичната борна концентрация на активната зона при преходни процеси на ^{135}Xe при изменение на мощността от $N1=104\%$ до $N2=75\%$ за 200 еф. денонощия



Фиг. 19 Изменение на реактивността на активната зона при преходни процеси на ^{135}Xe при изменение на мощността от $N1=104\%$ до $N2=75\%$ за края на кампанията



Фиг. 20 Изменение на критичната борна концентрация на активната зона при преходни процеси на ^{135}Xe при изменение на мощността от $N1=104\%$ до $N2=75\%$ за края на кампанията

Ефективни деноноция	HELHEX	CriticalCalc	Абсолютна разлика	
0 еф.д.	-0.22	-0.25	0.03 %	$\Delta\rho \{ \%$
	0.44	0.41	0.03 g/kg	$\Delta CBAcr \{ g/kg \}$
200 еф.д	-0.20	-0.23	0.03 %	$\Delta\rho \{ \%$
	0.50	0.50	0.00 g/kg	$\Delta CBAcr \{ g/kg \}$
304 еф.д	-0.19	-0.21	0.02 %	$\Delta\rho \{ \%$
	0.53	0.54	0.01 g/kg	$\Delta CBAcr \{ g/kg \}$

Анализ на резултатите при понижаване на мощност:

Минималното изменение на реактивността $\Delta\rho$, обусловено от ксенона, за примерната горивна кампания при понижаване на мощността от номинална до 75% $N_{ном.}$, е съответно:

-за 0 ефективни HEX: -0.22%, CC: -0.25%,

-за 200 еф. д. HEX: -0.20%, CC: -0.23%,

-за 304 еф. д. HEX: -0.19%, CC: -0.21%.

$\Delta CBAcr \{ g/kg \}$ за съответната кампания са:

-за 0 ефективни HEX: 0.44 g/kg, CC: 0.41 g/kg,

-за 200 еф. д. HEX: 0.50 g/kg, CC: 0.50 g/kg,

-за 304 еф. д. HEX: 0.53 g/kg, CC: 0.54 g/kg.

Равновесното отравяне практически се установява за около 70–90 часа при работа на постоянна мощност.

При преходен процес от пълна мощност до 75% $N_{ном.}$ наблюдаваме отново ксенонов преходен процес започващ с йодна яма и по-нататъшно разотравяне до концентрация на Хе равновесна за по-ниската мощност на реактора, т.е. – по-ниска. Ако направим аналогия с процеса разглеждащ понижаване на мощност до 0 (спиране на реактора), то тук:

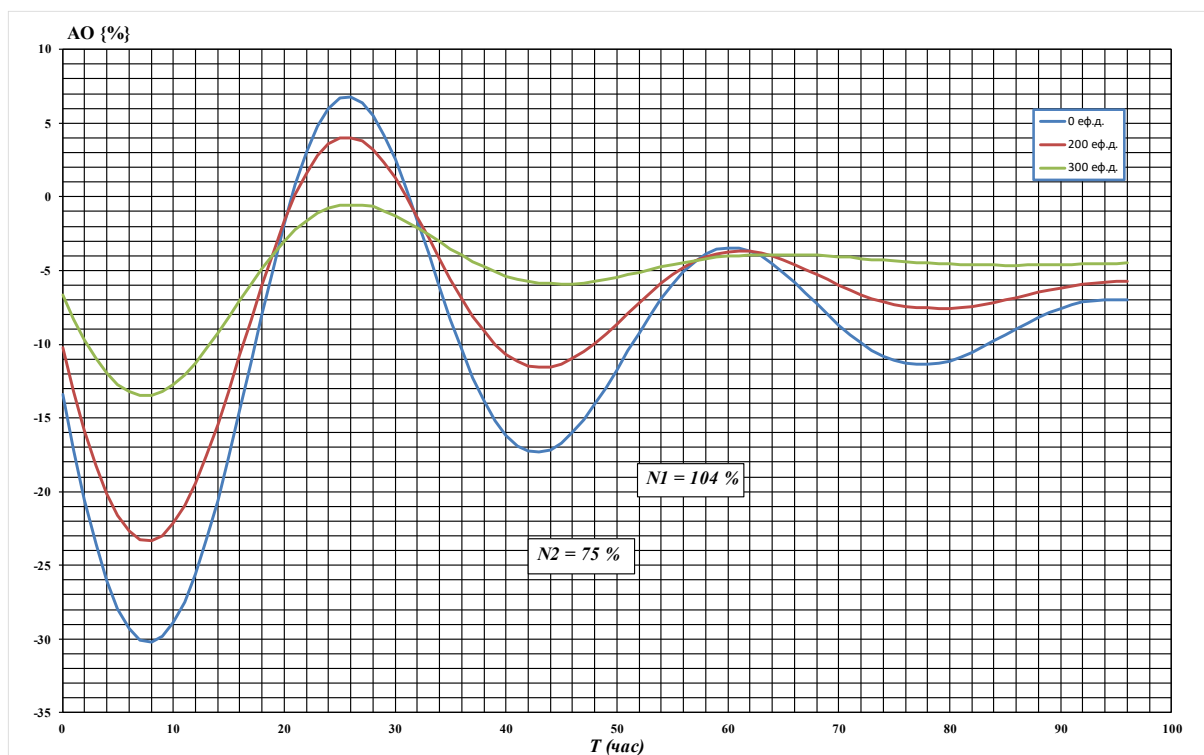
1. В крайното състояние (75% мощност) неутронният поток в реактора е по-нисък, но остава значителен. Концентрацията на йода характерна за началното състояние е по-висока и при новата мощност следва да се установи към по-ниска (йодна концентрация). Докато и по-точно преди това да се случи ще наблюдаваме отново йодна яма – нарастване на концентрацията на ксенона. В този случай обаче ^{135}Xe бива изведен от активната зона, както при спонтанен разпад, така и след залавяне на неутрон (неутронният поток в зоната е ненулев). Затова тук изравняване на скоростта на генерация и „загуба“ на ^{135}Xe се достига по-рано – около 4 часа (HEX) / 5 часа (CC) (фиг.19), времето за достигане на максималната дълбочина на йодната яма зависи от относителното намаляване на мощността на реактора.
2. Активният канал на загубата на ксенон чрез залавяне на неутрон при разглеждания преход (104% - 75%) ограничава достигането на толкова голяма дълбочина на йодната яма, както в случая на спиране на реактора $\Delta\rho$ HEX: -1.56% и CC: - 1.93% за края на кампанията. В нашия случай достига до HEX: -0.19, CC: -0.21 за края на кампанията.
3. Друг характерен ефект при разглеждания преход с понижаване на мощност (между две състояния на мощност), е това че могат да възникнат ксенонови колебания в пълната мощност и също в разпределението на мощността (формата на

енергоотделянето). Промяната на мощността изменя подгряването на топлоносителя и съответно разпределението на неговата плътност по височината на активната зона, което води и до изменение на аксиалния офсет. Също така, в хода на кампанията аксиалният офсет в активната зона се променя, като в края на кампанията се наблюдава изтегляне на енергоотделянето в посока на горния край на активната зона. Така при всяка въведена промяна на мощността на реактора, в отделните части (ако разделим зоната на горна и долна част) от активната зона започват своеобразни локални ксенонови колебания, защото както вече стана ясно освен въведената промяна в енергоотделянето аксиално, предварителната концентрация на ^{135}Xe е пропорционална на мощността, а в частния случай концентрацията на ^{135}Xe във всеки обем на зоната е пропорционална на локалното енергоотделяне (или мощност).

4. Удължената активна зона на ВВЕР-1000 благоприятства реализирането на аксиални ксенонови колебания (в разпределението на мощността). Ксеноновите колебания се засилват в края на кампанията поради липсата на интерференция на ксенона с други поглъщители, увеличаването на неутронния поток и също поради промяната на стационарното аксиално енергоотделяне в активната зона. От една страна енергоотделянето в края на кампанията е изтеглено нагоре, от друга намаленият подгрев при преход към по-ниска мощност ще доведе до допълнително приоритизиране на енергоотделянето в горната част на зоната, така в двете части, горна и долна, на зоната ще протичат различни локални процеси на отравяне и разотравяне с прехвърляне на основното енергоотделяне ту в горната, ту в долната част на зоната

Така от приложените графики на процеси от HELNEX можем да установим относително гладка промяна в реактивността в началото на кампанията (подобна на тази при преход от пълна към нулева мощност) и отчетливи колебания в реактивността (респективно пълната мощност) след прехода от мощност $104\%N_{\text{ном.}}$ до $75\%N_{\text{ном.}}$ при 200 еф. ден. и края на кампанията.

Колебанията във формата на енергоотделяне/разпределение на мощността могат да се проследят в допълнително представената фигура:

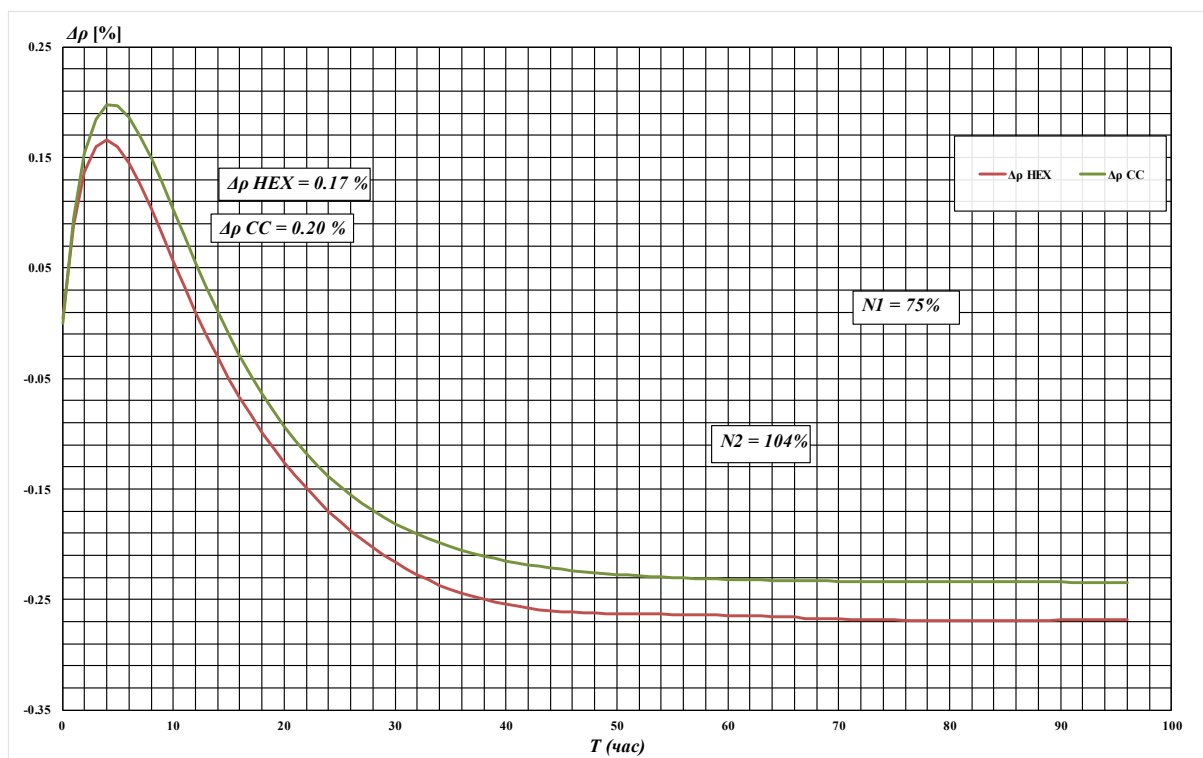


Фиг. 21 Изменение на аксиалния офсет в активната зона при преходни процеси на ^{135}Xe при изменение на мощността от $N1=104\%$ до $N2=75\%$ за 0еф.ден., 200еф. ден., за края на кампанията

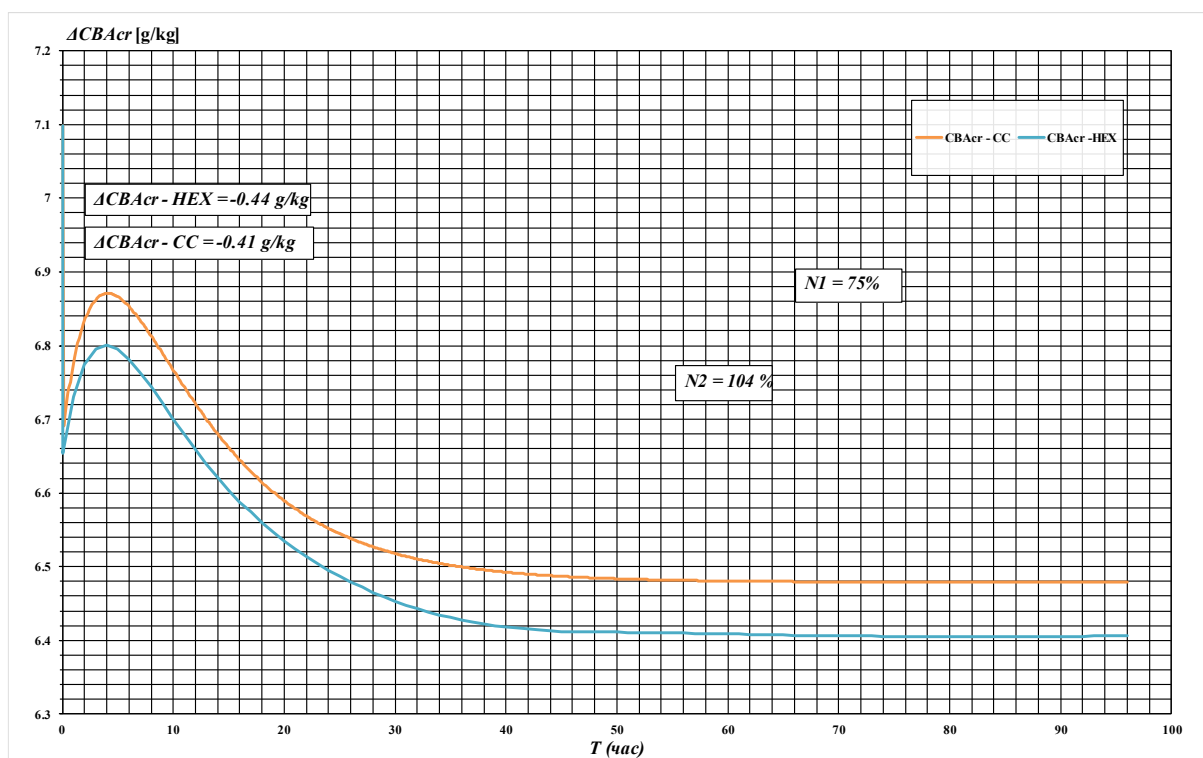
Тъй като ксеноновите колебания в пълната мощност и във формата на енергоотделянето в активната зона се засилват в хода на кампанията, то при тези преходи към по-ниска мощност е трудно да се търси корелация между глобалните ефекти в активната зона и дълбочината на реализираната йодна яма и с достигнатата квазистационарна реактивност (отравяне) в края на процесите в отделните моменти от кампанията.

CriticalCalc пресмята средното за активната зона ксеноново отравяне без да отчита пространственото разпределение на енергоотделянето. Това е причината да не се наблюдават ксенонови колебания.

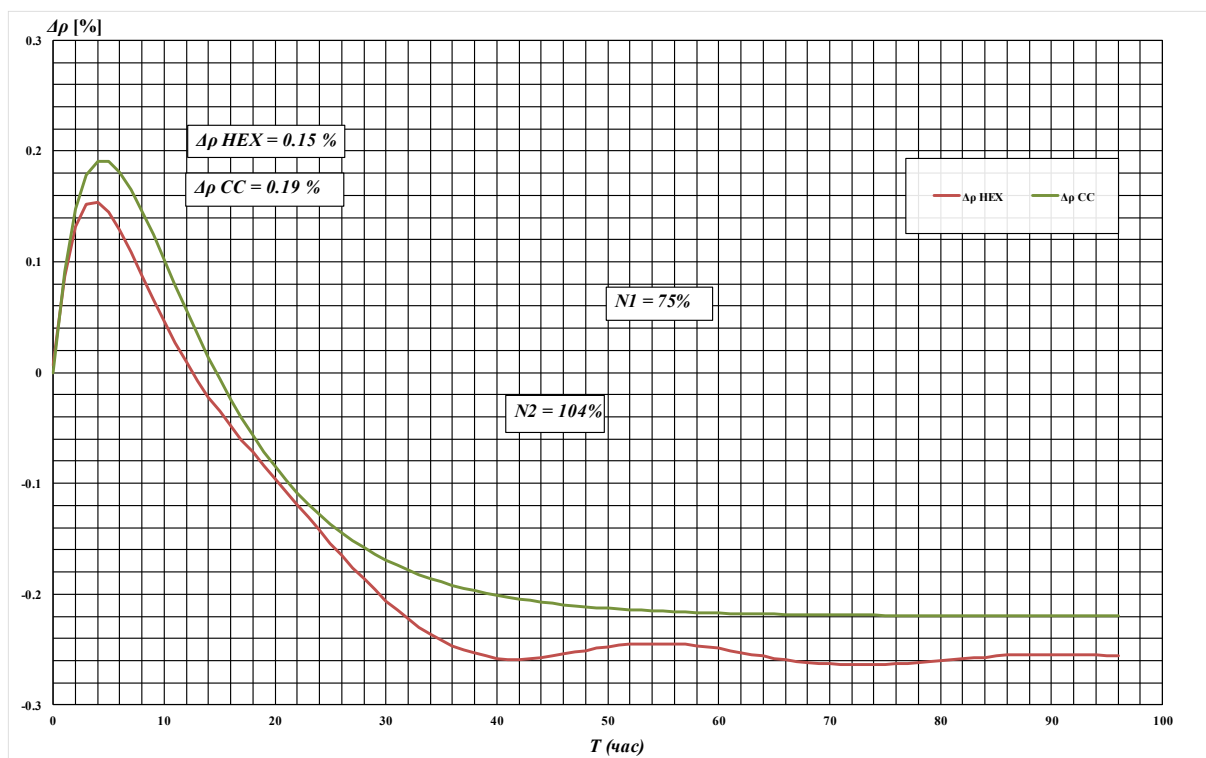
С напредването на кампанията ΔCBACr нараства като цяло, но зависимостта не е напълно еднозначна поради влиянието на променящото се пространствено разпределение на мощността и ксеноновите колебания.



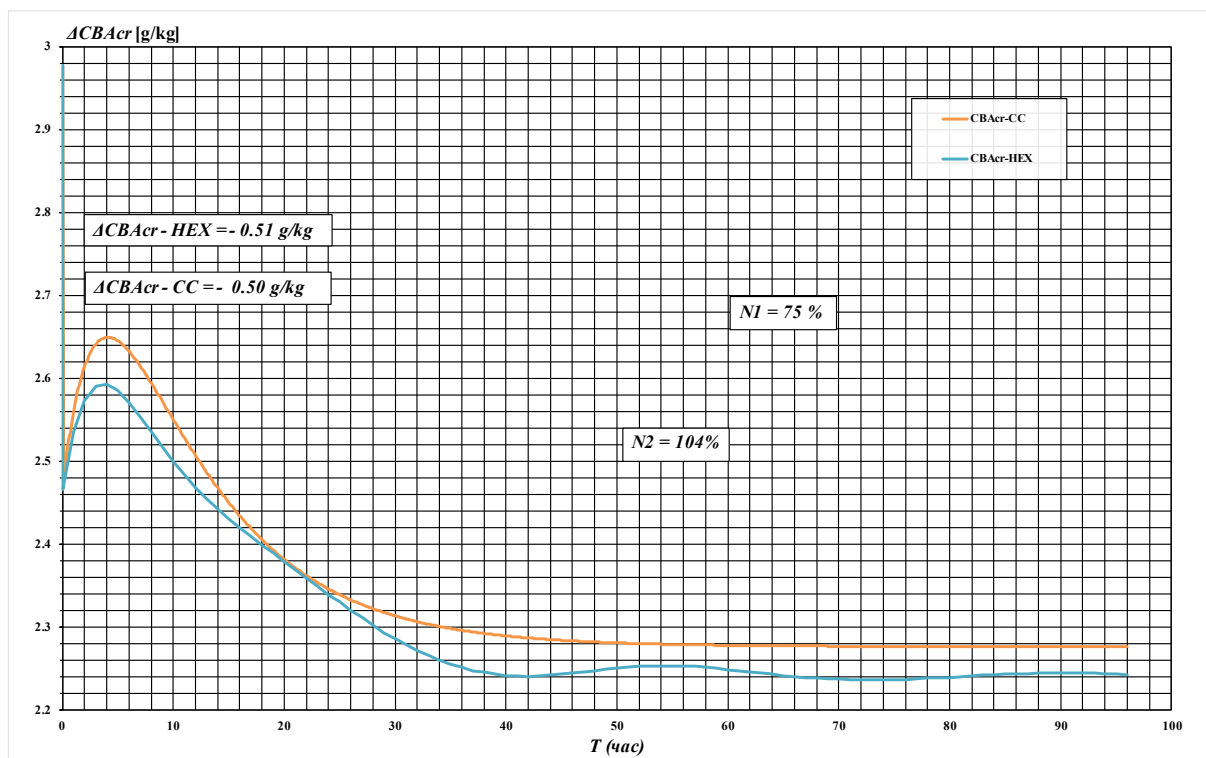
Фиг. 22 Изменение на реактивността на активната зона при преходни процеси на ^{135}Xe при изменение на мощността от $N1=75\%$ до $N2=104\%$ за началото на кампанията



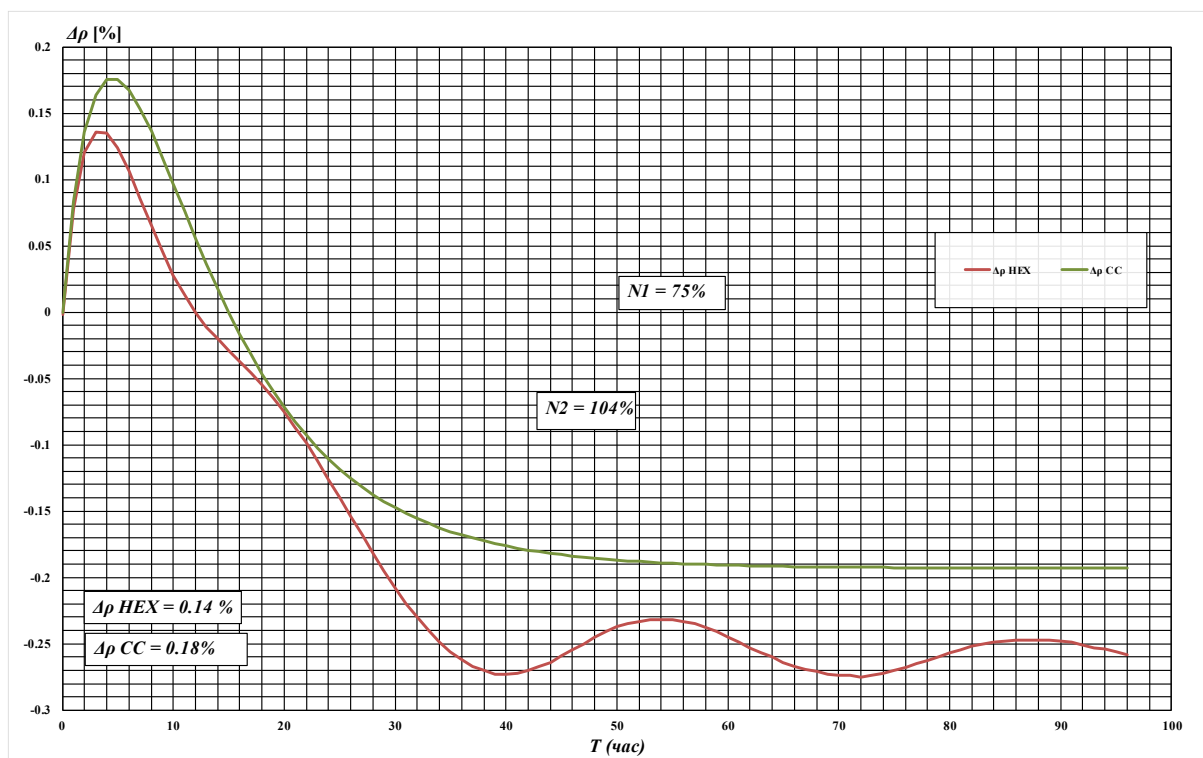
Фиг. 23 Изменение на критичната борна концентрация на активната зона при преходни процеси на ^{135}Xe при изменение на мощността от $N1=75\%$ до $N2=104\%$ за началото на кампанията



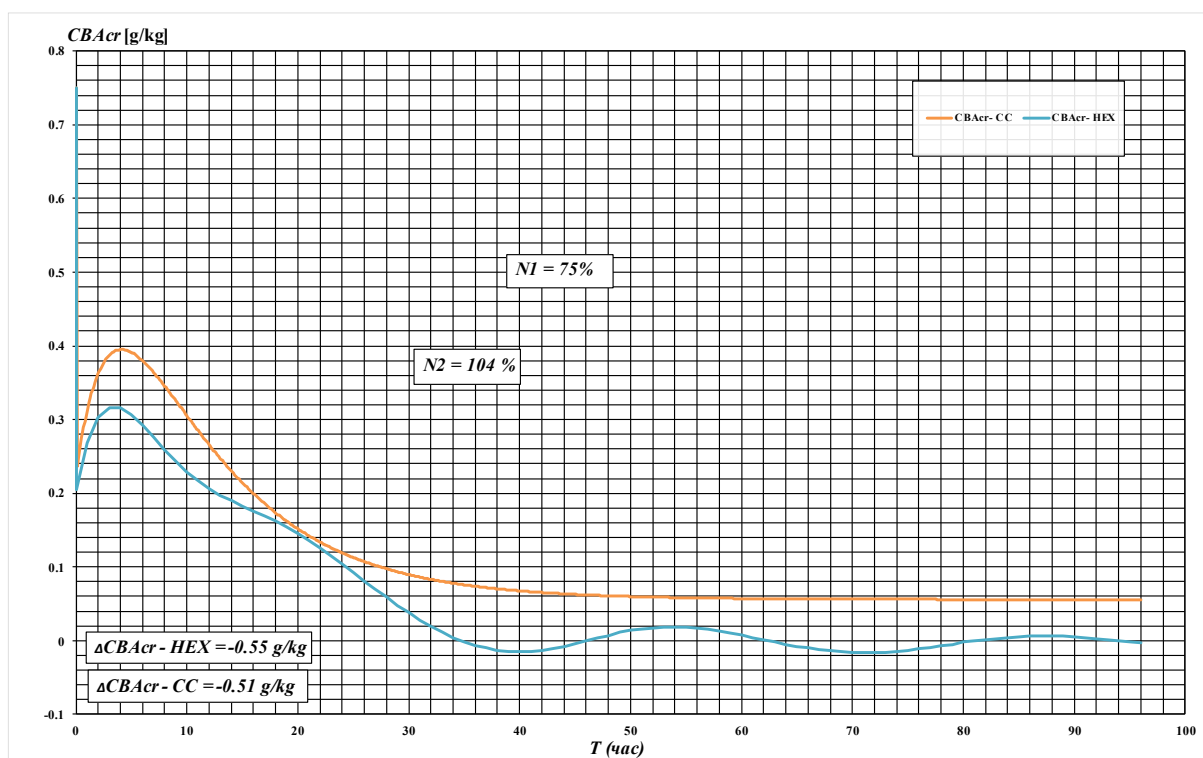
Фиг. 24 Изменение на реактивността на активната зона при преходни процеси на ^{135}Xe при изменение на мощността от $N1=75\%$ до $N2=104\%$ на 200 еф.ден. по време на кампанията.



Фиг.25 Изменение на критичната борна концентрация на активната зона при преходни процеси на ^{135}Xe при изменение на мощността от $N1=75\%$ до $N2=104\%$ за 200 еф. денонощия



Фиг. 26 Изменение на реактивността на активната зона при преходни процеси на ^{135}Xe при изменение на мощността от $N1=75\%$ до $N2=104\%$ за края на кампанията.



Фиг. 27 Изменение на критичната борна концентрация на активната зона при преходни процеси на ^{135}Xe при изменение на мощността от $N1=75\%$ до $N2=104\%$ за края на кампанията

Ефективни денонощия	HELHEX	CriticalCalc	Абсолютна разлика	
0 еф.д.	0.17	0.20	0.03 %	$\Delta\rho \{ \%$
	-0.44	-0.41	0.03 g/kg	$\Delta\text{CBAcr}\{g/kg\}$
200 еф.д.	0.15	0.19	0.04 %	$\Delta\rho \{ \%$
	-0.51	-0.50	0.01 g/kg	$\Delta\text{CBAcr}\{g/kg\}$
304 еф.д.	0.14%	0.18%	0.04 %	$\Delta\rho \{ \%$
	-0.55	-0.51	0.04 g/kg	$\Delta\text{CBAcr}\{g/kg\}$

Анализ на резултатите при повишаване на мощност:

-за 0 ефективни HEX: 0.17 %, CC: 0.20 %,

-за 200 еф. д. HEX: 0.15 %, CC: 0.19 %,

-за 304 еф. д. HEX: 0.14 %, CC: 0.18 %.

$\Delta\text{CBAcr}\{g/kg\}$ за съответната кампания са:

-за 0 ефективни HEX: -0.44 g/kg, CC: -0.41 g/kg,

-за 200 еф. д. HEX: -0.51 g/kg, CC: -0.50 g/kg,

-за 304 еф. д. HEX: -0.55 g/kg, CC: -0.51 g/kg.

Ефектите тук, при повишаване на мощността от 75%N_{ном.} до 104%N_{ном.}, са съвсем подобни на разгледаните при обратния преход – 104%N_{ном.} до 75%N_{ном.} Повишаването на мощността води до увеличаване на неутронния поток, съответно до временно намаляване на концентрацията на ¹³⁵Xe и освобождаване на положителна реактивност. Повишеният брой деления води до натрупване на допълнителни количества ядра на ¹³⁵I (до нова, повишена стационарна концентрация на йод) и с известно закъснение до повишаване на концентрацията на ¹³⁵Xe до новата равновесна за по-високата мощност, т.е. след първоначалното намаляване на отравянето от ксенон то нараства до нова, по-висока стойност.

В известна степен ефектите имат огледален характер спрямо предходно разгледаните (понижаване на мощност). Общите изводи се запазват.

Вижда се, че след прехода от 75%N_{ном.} до 104%N_{ном.} стационарното ксеноново отравяне практически се установява приблизително след 90 часа работа на реактора при постоянна мощност 104%N_{ном.}

Заклучение:

В настоящата дипломна работа са разгледани ксеноновите преходни процеси в реактор ВВЕР-1000 при изменение на мощността. Проследено е изменението на концентрациите на ¹³⁵I и ¹³⁵Xe, както и влиянието на ксеноновото отравяне върху реактивността и критичната концентрация на борна киселина.

При разгледаните изменения на мощността се наблюдава характерното за ксеноновите преходни процеси изменение на концентрациите на ¹³⁵I и ¹³⁵Xe. При повишаване на мощността концентрацията на ксенона постепенно се изменя до установяване на ново равновесно състояние,

като големината на отрицателния реактивен ефект зависи от конкретния момент от горивната кампания. С напредването на кампанията този ефект нараства по абсолютна стойност.

При намаляване на мощността до нула се проявява йодната яма, обусловена от продължаващото образуване на ^{135}Xe вследствие на разпада на натрупания ^{135}I и рязкото намаляване на неутронното му изгаряне. Получените резултати показват, че и в този случай отрицателният реактивен ефект се изменя в зависимост от състоянието на активната зона и нараства по абсолютна стойност с напредването на горивната кампания.

Промяната на ксеноновото отравяне се отразява пряко върху реактивностния баланс и върху критичната концентрация на борна киселина, необходима за поддържане на критично състояние на реактора.

Сравнението на резултатите, получени с CriticalCalc и HEX3D, показва добро съответствие между получените зависимости, като разликите в пресметнатите стойности са проследени за отделните разглеждани режими. Различията между двата подхода се обясняват с особеностите на използваните изчислителни модели и начина на отчитане на изменението на неутронфизичните характеристики на активната зона.

Получените резултати за критичната концентрация на борна киселина показват добро съответствие между CriticalCalc и HEX3D, като максималната установена разлика е 0,4 g/kg. Тази стойност може да се приеме за допустима с оглед на неопределеността на резултатите, получени с HEX3D, която е до $\pm 0,4$ g/kg. При стационарни състояния е приета допустима разлика от 0,3 g/kg между пресметнатата и измерената критична концентрация на борна киселина. Единственото по-голямо отклонение в разглежданите резултати се наблюдава в областта на максималната дълбочина на йодната яма (фиг.10), процесът е нестационарен и концентрацията на ^{135}Xe се изменя във времето. Поради това директното прилагане на критерия за стационарно състояние в този момент не е напълно коректно.

Извършеният анализ потвърждава значението на ксеноновите преходни процеси за реактивностния баланс на ВВЕР-1000. Отчитането им е необходимо както при оценката на реактивността, така и при определянето на критичната концентрация на борна киселина при различни режими на работа на реактора.

Списък на съкращенията:

АЕЦ – атомна електрическа централа

АЗ – активна зона

АРМ – автоматичен регулатор на мощността

ВВЕР – водо-воден енергиен реактор

ОР СУЗ – органи за регулиране на системата за управление и защита

ПГР – планов годишен ремонт

СУЗ – система за управление и защита

АО – аксиален офсет (Axial Offset)

CriticalCalc (CC) – програма за пресмятане на реактивностния баланс и критичната концентрация на борна киселина

HEX3D (HEX) – програмен код за тримерни неутроннофизични пресмятания на активната зона

УРБ - ускорено разтоварване на блока.

Литература:

- [1] - доц. д-р Петков, П. Т. „Експлоатационна реакторна физика и ядрена безопасност
- [2] Вапирев, Е., Христосков, И. „Неутронно-физични процеси при ВВЕР-440 (В-230) и ВВЕР-1000 (В-320). Пособие за инструктора“.
- [3] - Ръководство за потребителя на стационарна тримерна едроклетъчна и финоклетъчна двугрупова дифузионна програма HEX3DP.
- [4] - - доц. д-р И. Христосков, Физика на ядрените реактори, 2013 г.
- [5] – <https://www-nds.iaea.org/wimsd/fpyield/.htm#T2>